

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 8/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 8
2020**

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

Сквозной номер 143

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 8
2020**

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

«Вестник МГСУ» — рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре, целями которого являются публикация, распространение результатов российских и зарубежных научных исследований для обеспечения широкого обмена научной информацией, формирования открытого информационного кластера в области строительной науки и образования, повышения международного авторитета российской строительной науки.

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8. Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Тел.:	(499) 188-29-75
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	27.08.2020.
Подписан в свет	28.08.2020.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,17. Тираж 100 экз. Заказ № 111

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

Евгений Валерьевич Королев, д-р техн. наук, проф., зам. директора НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Дмитрий Николаевич Силка, д-р экон. наук, доц., зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Ответственный секретарь научных журналов

Маргарита Владимировна Митькина

Корректор

Любовь Владимировна Светличная

Выпускающий редактор

Анна Александровна Дядичева

Дизайн и верстка

Александр Дмитриевич Федотов

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык

Ольга Валерьевна Юденкова

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

Редакционный совет

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

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

Николай Владимирович Баничук, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	27.08.2020

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

Dmitry N. Silka, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Moscow, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive secretary

in charge of research journals

Margarita V. Mitkina

Executive editor

Anna A. Dyadicheva

Editors

Tat'yana V. Berdnikova

Corrector

Lyubov' V. Svetlichnaya

Layout

Aleksandr D. Fedotov

Russian-English translation

Ol'ga V. Yudenkova

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Andrey A. Volkov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Разда Ал-Дайни, Асади Саманех, Н.В. Данилина

Strategic planning, swot assessment method to develop the religious urban planning of city (case study Karbala city in Iraq) (Стратегическое планирование религиозных городов: на примере города Карбала в Ираке).1081

Д.Д. Попова

Этапы социализации индустриального наследия в Москве1090

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

Л.А. Илларионова, А.А. Локтев

Моделирование анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях1105

Д.Н. Арипов, И.Л. Кузнецов, М.А. Салахутдинов

Несущая способность листовых фасонок из пултрузионного стеклопластика в решетчатых конструкциях1115

Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко, Д.Д. Заборова, О.С. Гамаюнова

Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения1126

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

К.Л. Чертес, Н.И. Шестаков

Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора1135

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ю.М. Косиченко, О.А. Баев

Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации.1147

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

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

Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса1163

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Кудреватых

Особенности управления требованиями в сфере управления проектами в инжиниринговой компании полного цикла1175

Е.А. Гусакова, А.Н. Овчинников

Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками1191

Требования к оформлению научной статьи1201

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Raeda Al-Daini, Asadi Samaneh, Nina V. Danilina

Strategic urban planning of religious cities: the case study of Karbala city in Iraq1081

Darya D. Popova

Stages of industrial heritage socialization in Moscow1090

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

Lilia A. Illarionova, Alexey A. Loktev

Modeling of anisotropic base plate of a ballastless railway track under dynamic influences1105

Daler N. Aripov, Ivan L. Kuznetsov, Marat A. Salakhutdinov

Bearing capacity of pultrusion fiberglass gusset sheets in frame structures1115

Tatiana A. Musorina, Mikhail R. Petrichenko, Daria D. Zaborova, Olga S. Gamayunova

Determination of active and reactive thermal resistance of one-layer building envelopes1126

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Konstantin L. Chertes, Nikolay I. Shestakov

Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries1135

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Yuriy M. Kosichenko, Oleg A. Baev

Hydraulic efficiency of irrigation channels in the course of operation1147

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Vladimir A. Golovesov, Alexey G. Pervov, Genadiy D. Suhov, Galina Ya. Rudakova

Impact of chosen antiscalant on the operating costs value for reverse osmosis systems.1163

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vladimir V. Kudrevatykh

**Research of requirement management features in the field of project management
in a full-cycle engineering company.1175**

Elena A. Gusakova, Aleksey N. Ovchinnikov

Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows1191

Requirements for research paper design1201

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

Strategic urban planning of religious cities: the case study of Karbala city in Iraq

Raeda Al-Daini, Asadi Samaneh, Nina V. Danilina

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

ABSTRACT

Introduction. The issue of choosing the strategic development vector becomes key to the sustainability of cities that have great cultural and historical significance and serve as religious centres. The religious factor produces a high effect on all urban processes and has to be considered whenever urban development is planned. This issue is particularly relevant for Iraqi cities, as they have suffered greatly over the past years.

Materials and methods. The article offers an urban planning approach to assessing the current situation in the urban environment in order to determine the strategic vector of the city's future development. We used the SWOT analysis method that allowed us to apply a systematic approach to assessing the strengths and weaknesses that determine the current situation, and to identify development opportunities and threats that may act as hurdles. The SWOT analysis is applied to transportation planning in Karbala, Iraq.

Results. Principal theoretical and experimental results, relevant data, relationships and regularities, identified in the course of the research, are presented in the article. At the same time, new results and data of lasting significance, important discoveries, conclusions that overturn existing theories, as well as the data that, in the co-authors' opinion, are of practical importance are preferred.

Conclusions. The data, obtained by the co-authors, should serve as the basis for a strategic plan of urban development of Karbala city, Iraq. Also, the approach and method of urban research, used there, can be applied to other religious cities that face similar problems affecting their sustainability and the quality of their urban environment.

KEYWORDS: urban planning, transportation network, SWOT method, religious city, urban centre, strategic planning, sustainable development, cultural heritage

FOR CITATION: Raeda Al-Daini, Asadi Samaneh, Danilina N.V. Strategic urban planning of religious cities: the case study of Karbala city in Iraq. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1081-1089. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1081-1089 (rus.).

Стратегическое планирование религиозных городов на примере города Кербела в Ираке

Раэда Ал-Дайни, Асади Саманех, Н.В. Данилина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для городов, которые имеют культурное и историческое значение и являются религиозными центрами, вопрос определения стратегического вектора развития становится залогом устойчивости. Религиозный фактор оказывает исключительно большое влияние на все городские процессы, и его необходимо учитывать при планировании развития городов. Особенно этот вопрос актуален для городов Ирака, которые сильно пострадали за прошедшие годы.

Материалы и методы. Предлагается градостроительный подход к оценке нынешнего состояния городской среды с целью выявления стратегического вектора развития города в будущем. Мы применили метод SWOT-анализа, который позволяет использовать системный подход к оценке сильных и слабых сторон, определяющих текущую ситуацию, а также выявить возможности для развития и угрозы, которые могут ему помешать. SWOT-анализ применен к планированию городского транспорта в г. Кербела в Ираке.

Результаты. Представлены основные теоретические результаты и результаты экспериментов, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается вновь полученным результатам и сведениям, которые надолго сохраняют свою значимость, важным открытиям, выводам, которые развенчивают существующие теории, а также данным, которые, по мнению авторов, обладают практическим значением.

Выводы. Полученная информация должна быть положена в основу стратегического плана градостроительного развития г. Кербела в Ираке. Кроме того, использованный подход и метод исследования городов могут быть распространены и на другие религиозные города, которые сталкиваются с аналогичными проблемами устойчивого развития и качества городской среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительство, транспортная система, SWOT-анализ, религиозный город, городской центр, стратегическое планирование, устойчивое развитие, культурное наследие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Разда Ал-Дайни, Асади Саманех, Данилина Н.В. Strategic urban planning of religious cities: the case study of Karbala city in Iraq // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1081–1089. DOI:10.22227/1997-0935.2020.8.1081-1089

INTRODUCTION

Sustainable strategic planning is now particularly relevant for cities that are in the state of post-war and economic decline. Many urban planning problems create uncomfortable and unsafe living conditions for the population [1, 2]. Problems of urban land use, urbanization, and transport systems create problems for the socio-economic urban development [3, 4].

This issue is particularly relevant for the cities that have preserved their cultural and historical heritage deeply intertwined with the life of the population [5]. Islam is not a mere religion for the countries of the East that have preserved their cultural and historical heritage. Islam determines their mode of life. The point is that the lack of strategic urban planning, that takes account of the location of religious centres, generates many problems for urban residents both in their everyday life and on holidays [6, 7]. The religious calendar defines the days of intensive religious tourism, and the infrastructure of cities cannot withstand the overload. Religious buildings become centres of attraction for traffic and pedestrian flows. The task of urban planning is to take these flows into account when developing master plans of cities to assure their sustainable development [8].

Development of a strategic plan of urban development is relevant for Iraq, which has experienced difficult times, and now its urban development needs particular attention [9]. The majestic beauty and aesthetics of religious cities in Iraq originate from the distinctive Islamic style in architecture. Therefore, the willingness to demonstrate this beauty should be the top priority. This is precisely what developed countries of the world do, and their heritage and ancient architecture attract special attention [10, 11]. Over the past decades, the city of Karbala was subjected to neglect, deliberate sabotage and disruption of its distinguished religious and civilizational role, due to the backwardness in the urban, artistic and intellectual vision. Little attention was paid to its urban environment and unique structure; the city centre was distorted in a striking way, especially the areas surrounding the holy sites [12]. In 1991, large areas of the city centre were demolished at the order of the government on the pretext of its expansion, although no scientific research aimed at further re-planning and design had been performed. Certainly, the unavailability of appropriate solutions resulted in Karbala's losing many of its distinctive Islamic features.

MATERIALS AND METHODS

Urban planning research in the field of religion and urban development requires a sensitive approach and consideration of local mentality [12]. However, the urban development process is never ending, and it requires development and modernization in accordance with the most recent needs of the society and every citizen [13].

Modern science offers a variety of analytical and mathematical tools for the processing of extensive data. As for the assessment of the present-day state of the urban environment, it is advisable to use SWOT analysis, widely used in economic research, as it is capable of adequately assessing the situation [14].

The SWOT analysis method was used to study the current situation in Karbala. This assessment method (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) is an analytical tool that provides comprehensive data for SWOT analysis. The purpose of the analysis of external opportunities and threats is to find out whether creativity can take advantage of the opportunities and avoid threats when facing an unstable external environment of volatile prices, political destabilization, social transition, changes in the rule of law, etc. The purpose of the analysis of internal strengths and weaknesses is to evaluate how creativity performs its internal work, such as management, work efficiency, research and development, etc. The idea of this tool is to discover what can be strengthened, and the factors that must be monitored and controlled, so as not to negatively affect the project objective. This can contribute to providing well detailed knowledge that can even anticipate unplanned surprises [15], design strategies for the establishment of industrial areas, based on environmental studies, using the SWOT technique and GIS, needed to advance strategies and improve environmental performance. Urban planners make extensive use of this method to assess the current state of urban systems, assess weaknesses and strengths, development opportunities and emerging threats. The scope of application of this method includes the operation of transport systems, environmental conditions, land use, study of the population behavior and urban processes. This method enables researchers to formulate prerequisites for further urban development that serves as the basis of strategic planning. The article offers an approach to the study of the strategic planning of religious cities with account taken of their cultural and historical heritage [16, 17].

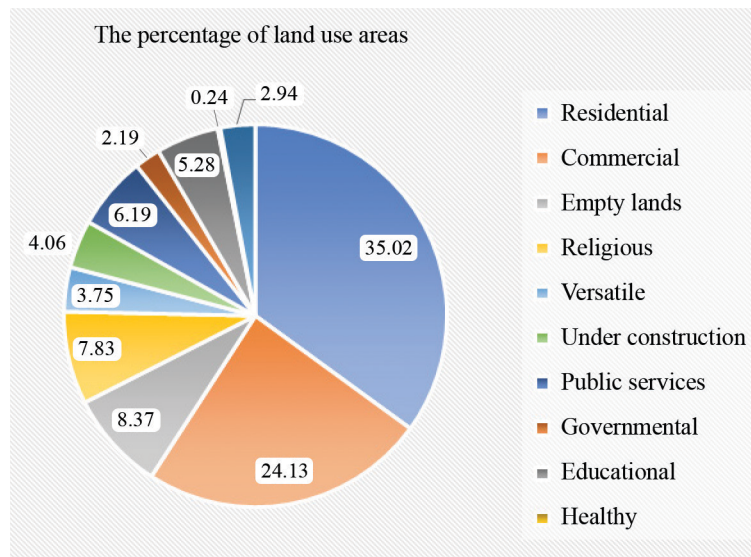


Fig. 1. Land use in central Karbala

RESULTS OF THE RESEARCH

Religious places usually occupy major structures in central districts of Arabic and Islamic cities because they represent their beating heart.

A traditional city centre, being the oldest area and the nucleus of a city, is vitally important because it is most closely related to all urban economic activities. This district is also one of the areas that demonstrates top prices, so it is often called the Central Services Area. The religious factor influences land use and planning in the city centre through its control over commercial, residential and administrative uses. Service providers are concentrated there, they include hotels located not far from religious places; their number reached 421 in the city in 2011 [18], according to the official information provided by Karbala Urban Planning Department, let alone commercial areas and commodity stores shown in Fig. 1.

Markets control the majority of central streets, such as Qibla Al-Hussein Street, Al-Abbas Street, Imam Ali Street, and the area adjacent to the shrines. 24.13 % of land in the city centre is used by commercial enterprises.

7.83 % of land in the city centre is used for religious purposes. The internal structure of land use in the city centre is based on competition formulas, land prices, and functional activities [19].

The use of land for debt repayment purposes indicates the difficulty of making any spatial change in the city centre where land price and value play a significant role. The housing share is 35.02 %, and the area is home to 43.972 residents; this figure accounts for 3.17 % of the total population of the city distributed over 9 % of residential neighborhoods, Eastern and Western Abbasids, Bab al-Taq, Bab al-Najaf, Bab Baghdad, Bab al-Salama, Bab Tawirij and the camp.

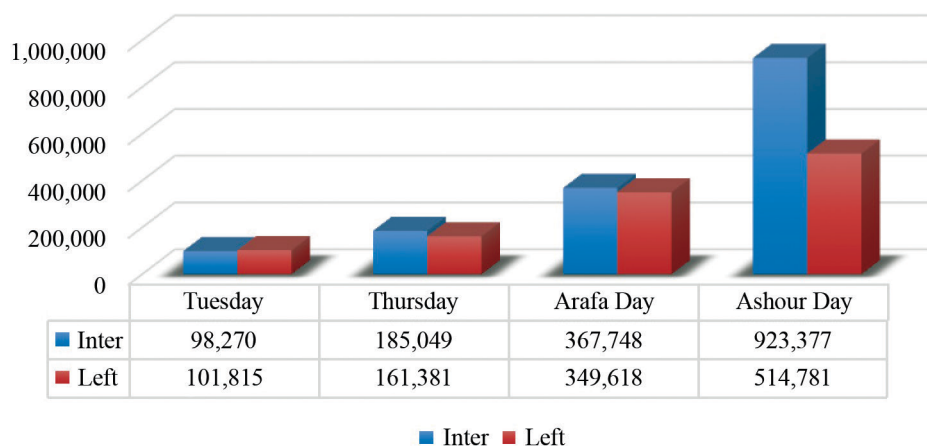


Fig. 2. The average number of visitors to Karbala on different occasions

Planning procedures that are to find their way to serve the city, must be launched in the central district because of its extreme importance as a vital centre of all activities and the best starting point for any successful planning process. Religious use prevails over the rest of uses; therefore, accompanying uses enjoy suitable spatial distribution consistent with the needs of the local population and religious tourism that the confession supports.

Religious tourism has recently become an important international phenomenon closely linked to the pace of human development, to the ability to use free time and whatever is attributable to it, and to progress and prosperity. It is also an important criterion of progress of international relations in all aspects of economic and social life, and it also fosters interaction between human civilizations, knowledge exchange, tolerance, and spreads the concept of international peace. Tourism is one of the most vital sectors involved in national development programmes in many countries of the world.

Tourism contributes 10 % to the total global output, or approximately USD 3.4 trillion as of the end of the 20th century, or in 1995; it accounted for nearly 7 %

of local jobs, and its share went up about 7 trillion USD in infrastructural investments associated with the global travel industry (Alateby, 2002). Almost all researchers agree on the concept of tourism as a set of phenomena and relationships that arise as a result of travelling or temporary residence which does not turn into permanent residence related to paid work (Dennison, 1981).

Religious tourism is the most important type of tourism, as it transports tourists from their places of residence to different places for religious visits and trips inside and outside the country for limited periods of time. Religious tourism is an economic resource that supports the Iraqi economic structure through the savings it provides. However, volatile currencies cannot serve as effective instruments of the public economic policy used to properly dispose of the resources of a civilized country and drivers of the national economy. As Iraq is home to various religious cultures, including Arabic Islam, it is considered one of the most prominent Islamic centres in the world. The city of Karbala with its famous religious and human heritage is witnessing a large-scale rise in tourism in various seasons of the year, when hundreds of thousands of immigrants and reli-

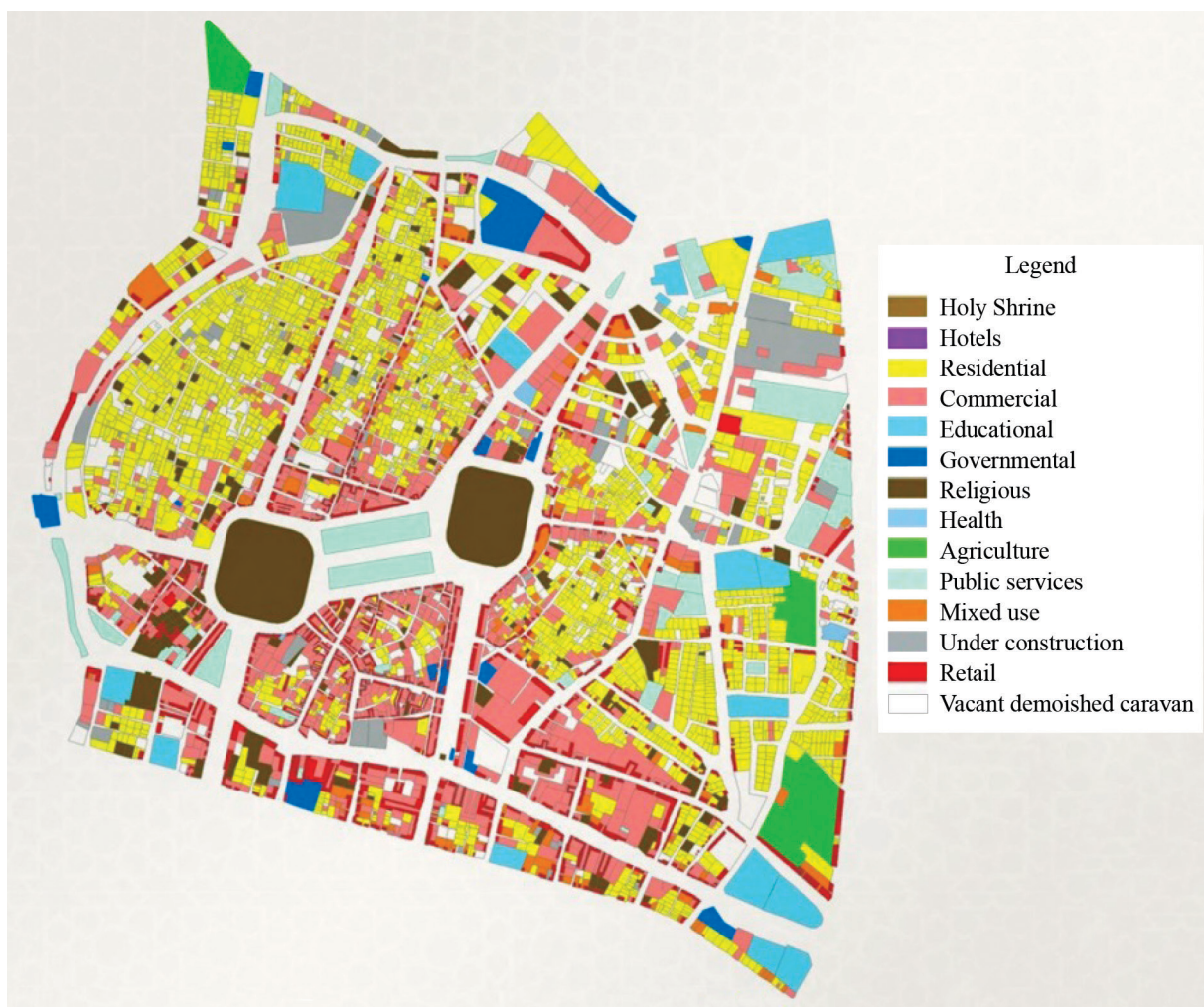


Fig. 3. Land use map. Karbala centre city

religious tourists from all over the Islamic world visit Shirin, its archeological and tourist landmarks on religious occasions that differ in importance and the number of visitors. In this paper, SWOT analysis is applied to analyze the Karbala transport network in Iraq. The mission of the analysis is to determine whether innovations can capture the opportunities and help to avoid the threats, such as price changes, political destabilization, social transformation, changes in the rule of law, etc. The assessment of strengths and weaknesses helps to analyze the role of creativity in management, research and innovation, etc. [20]. Observations, provided by insiders, and documentary reviews were applied to collect and analyze the data.

The results of the SWOT analysis are provided in Table 1.

The results of the research should be described in such a way that the reader could trace its stages and assess the validity of the conclusions made by the author. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, summarizing and explaining the data. The results are supported by illustrations (tables, graphs, pictures) representing original material or evidence. It is important that illustrative information does not duplicate the text. The results presented in the article should be compared with earlier works in this field written both by the author and other researchers. This comparison will disclose the novelty of this research and ensure its impartiality. The results of the research should be summarized, although, at the same time they should contain enough information to assess the conclusions.

Table 1. SWOT analysis results

STRENGTHS	WEAKNESSES
1. The shrines of Imam Al-Hussein and Al-Abbas are the spiritual component of the city, and the reason for urban sustainability. 2. Travel destinations in the city centre are located at a distance from residential neighborhoods, and the latter have few visitors. 3. A large square between the two holy mosques accommodates numerous tourists. 4. The breakdown of visitors is shown in Fig. 2. 5. The city has five main entrances and exits. 6. The city centre is close to the main roads that connect Karbala with other cities of Iraq located to the east, south and north of this city. 7. The width of Imam Hussain and Abbas Streets is relatively acceptable (40 m)	1. Poor provision of basic services to visitors. 2. Poor urban planning of religious institutions in the city and surrounding urban facilities of various types, so religious shrines suffer from severe crowds, and the proximity of numerous other buildings such as residential houses, retail trade offices, administrative and financial institutions, and this urban structure does not meet the spatial requirements applied to these religious and tourist landmarks, their functional and regional status. This reflects poor performance of the urban religious function. 3. The neglect of such aspects of travelling that are closely related to religious institutions and places of worship; restriction of their role in religious tourism; few neat green areas, leisure zones, entertainment services. 4. Problems of the internal road network, its functional overlap and negligence that accompany planning activities. As a result, visitors cannot reach religious places and spend their spare time there, let alone the problems that arise due to the limited number of available vehicles. 5. A weak travel potential of the city, particularly with regard to travel agencies and offices, in addition to the lack of financial and banking services there make the city less attractive in the eyes of expatriates, who expect high quality travel services. 6. The neglect of travel activities at the level of the national policy and economic plans, as well as limited attention to travelling as an important economic resource, coupled with dependence on oil revenues supporting the national economy, despite the awareness of oil depletion, unlike tourism, which is similar to inexhaustible oil. 7. Karbala has 0.04 % population growth, and 35 % of land is used for residential purposes in the centre of the city. 8. The inability to accommodate large numbers of people at the end of each event. Visitors experience problems when returning to their cities. 9. The lack of parking lots needed to accommodate a large number of vehicles, as visitors drive their own cars. 10. There is no public transportation system, since most buses are privately owned. There is no organized and well-studied bus network that covers crowded areas. 11. There is no investment in any modern technology to guide visitors and reduce crowds. 12. Reliance on private cars will boost the need for parking lots. 13. Poor street quality in mountainous areas

OPPORTUNITIES	THREATS
1. Religious tourism offers great opportunities for economic progress. 2. Relative security and stability helps to raise investments. 3. Oil prices help to develop the infrastructure. 4. Advanced scientific and technological methods are to be implemented to guide visitors when traffic jams occur. 5. Reduction of environmental pollution effects through greening and exploitation of orchard areas around the city. 6. Squares in the city centre (which are currently used as parking lots) are considered as a positive factor. 7. Relatively short distances and roads connecting main streets of the city make it easy to take advantage of freestyle bikes. 8. Housing facilities can be built outside the city centre, especially to the east and west, where conditions and spaces are available to assure population stability	1. Continued insecurity reduces investment opportunities and hinders the implementation of development plans. 2. A huge increase in visitors exceeds the urban accommodation capacity against the background of few emergency entrances and exits. 3. Erosion of old utility networks. 4. Problematic travelling around the city. 5. The need to move government authorities outside the city centre. 6. The need to remove residential areas adjacent to the shrines so that the area within the distance of one kilometer could be used for religious purposes. 7. Environmental integration/balance and focus on public transportation can help to develop a sustainable environment. 8. High traffic causes traffic jams. 9. The historic core may become a less popular landmark of the city and lead to divestment. 10. The city may become dominated by cars, and public transport between districts may not be efficient. 11. The circular road may foster the establishment of an efficient, sustainable and convenient public transport system

Stages of land use transformation in the traditional centre of a city have time frames and a clear planning structure that follows the reorganization and distribution of some land uses that affect religious activities, conducted in the traditional centre of the city of Karbala. The researcher believes that such planning steps can expand the range of religious activities and maintain its functional specificity and spatial dimensions; the researcher does not approve of “administrative, residential and commercial” land uses, as they affect religious tourism in the centre, so the researcher thinks it necessary to reorganize land use in the due course on the basis of the following proposals.

The main proposals for changing land use systems in the city centre were formulated.

The first proposal. The urban transport system should assure sustainability of the urban environment. It contemplates transformation of the passenger transport system to boost population mobility. The city has a pronounced radial system; its rays converge in the central religious area. The centre, full of transport and pedestrian flows, determines the following directions for the development of urban transit spaces:

- street conditions conducive to green modes via low-cost interventions such as sidewalk maintenance and speed restraint;
- pedestrian-only zones in areas with heavy pedestrian traffic;
- dedicated lanes for buses and bicycles, which are adequately protected from motor traffic;
- reasonable parking fees;
- more attention to the road infrastructure maintenance rather than construction of any new infrastructure.

The second proposal. Plans to build housing facilities outside the city centre, especially to the east and west, where areas are available to assure population stability; relocation of residents from the areas adjacent to the shrines and surrounding them with a 1 km-wide resident-free belt to preserve some ancient monuments; this may be implemented in the areas suitable for religious use, given that residential areas in the centre (35.02 %) is limited by the intersection in the north, the Bab Al-Qibla intersection in the south, the Saadiyya intersection in the west, and the Bab Tuwayrij intersection in the east as shown in Fig. 3. This should be done through deliberate legal procedures by means of which residents of these areas are compensated in a manner commensurable with their financial considerations, and this model is to be applied within a period of time not exceeding two years.

The third proposal. Relocation of business activities and service providers, such as markets and stores occupying 24.13 % of land in the city centre, to the borders of the proposed area. There, they will be clustered into “supermarkets” that meet the needs of local residents and visitors. According to the researcher, many commercial activities have recently moved from the centre to the outskirts due to high land and rent rates. The researcher believes that the implementation of this proposal will take some time that does not exceed two years, as it needs an appropriate legal framework.

The fourth proposal. This proposal contemplates the relocation of administrative services and related institutions and government agencies such as the urban planning department and other departments from the centre, as they affect religious tourism in a significant way, especially during official working days due to

the travel of urban residents to the city centre. Crowds add confusion and boost traffic; therefore, the researcher proposes to move these administrative services to less crowded areas away from the religious centre over a distance of, at least, 4–5 km. The implementation of this proposal should not exceed two years.

From the researcher's point of view, these proposals will provide suitable spaces for religious purposes in the traditional centre of the city, promote other activities and focus centres such as libraries, museums, mosques, places of worship and others, to let the centre focus on religious services and religious tourism, on the one hand, and remain free from commercial, administrative, and other services, on the other hand. It also maintains the spiritual Islamic atmosphere typical for the city centre, for the city to develop towards the southern side, as well as to assure the privacy of the city centre as an important religious core and the centre of religious services, and thus the city will have more than one provider of urban services (public and societal).

CONCLUSION AND DISCUSSION

Important research results are listed here:

1. Religious cities in Iraq represent tremendous wealth and an invaluable treasure due to the civilizational and religious heritage they constitute as an important cultural asset in the history of civilization in Iraq in addition to being a great economic resource.
2. The planning of religious cities in Iraq in general, including the area exposed to research, faces several obstacles, perhaps the most prominent of which is the central urban area (in terms of functions, demography and services), and it confuses urban planning processes and land use.
3. The city of Karbala is witnessing a significant increase in population rates due to the influence of the immigration factor. Perhaps one of the most prominent factors encouraging this type of migration or the so-called religious migration is the spiritual factor that characterizes the climate of religious cities; it is also responsible for any future population growth.
4. The system of public and community services is under pressure because of travelers. The pressure is

particularly high in the days of religious events when population numbers exceed one million, and the demand for services increases greatly.

5. The availability of services in the city, being the factor responsible for population distribution over residential areas, must be taken into account in the process of planning service provision areas and residential districts.

6. Religious tourism is vital for service planning in most religious cities and the city of Karbala in particular, as it is next to impossible to design a service provision system that accommodates large amounts of residents and tourists, so urban tourism is a vital factor of influence in terms of present and future service planning strategies.

7. The author shares several ideas aimed at the development of a traditional city centre, namely, four proposals that could preserve religious privacy and develop other types of land use.

To continue the discussion, the following recommendations are made in respect of the strategic planning of the city:

1. Transportation network development in a manner consistent with its basic vital function, that is, revival of the city and its traditional centre, on the one hand, and easy communication between the city and neighboring urban and religious centres, on the other hand.
2. Improvement of "health, recreational, and residential ..." services provided mainly to urban residents, and accelerated establishment of service centres near religious establishments. Service centres will operate for the benefit of residents and tourists.
3. The attention of the state is to be focused on religious landmarks and shrines, etc., and religious tourism is to be considered within the framework of sovereign economic development plans for this important economic resource to support the sovereign economy in the best possible manner.
4. The state should also focus on establishing numerous recreation areas, such as public squares and green spaces, and ensure the availability of banking services and public communications, as well as cafes and hotels.

REFERENCES

1. Levin N., Ali S., Crandal D., Kark S. World heritage in danger: Big data and remote sensing can help protect sites in conflict zones. *Global Environmental Change*. 2019; 55:97-104. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.02.001
2. Shafik S., Aly A. Modernization and regionalism: Approaches for sustainable revival of local urban identity. *Procedia Engineering*. 2011; 21:503-512. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2044
3. Bertacchini E., Segre G. Introduction: Culture, sustainable development and social quality: A paradigm shift in the economic analysis of cultural production and heritage conservation. *City, Culture and Society*. 2016; 7(2):69-70. DOI: 10.1016/j.ccs.2015.12.007
4. Trillo C., Petti L. A novel paradigm to achieve sustainable regeneration in historical centers with cultural heritage. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2016; 223:693-697. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.243

5. Belal A., Shcherbina E. Heritage in post-war period challenges and solutions. *IFAC-PapersOnLine*. 2019; 52(25):252-257. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.491
6. Al-Janaby S.H. City center and impact on the urban complex. *Journal of the Iraqi. Geographical Society*. 1985; 16:46.
7. Alateby A.S. Tourism and recreation in the State of Kuwait (geographic study). *Journal of Gulf Studies and Arabia*. 2002; 107:155.
8. Hutchinson F.P., Herborn P.J. Landscapes for peace: A case study of active learning about urban environments and the future. *Future*. 2012; 44(1):24-35. DOI: 10.1016/j.futures.2011.08.004
9. Mohammed H., Amin T.M. The impact of heritage decline on urban social life. *Journal of Environmental Psychology*. 2018; 55:34-47. DOI: 10.1016/j.jenvp.2017.12.002
10. Romeo E., Morezzi E., Rudiero R. Industrial heritage: Reflections on the use compatibility of cultural sustainability and energy efficiency. *Energy Procedia*. 2015; 78:1305-1310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.145
11. Savory R.M. The religious environment in the Middle East. *Business and the Middle East*. 1982; 1-38. DOI: 10.1016/b978-0-08-025992-5.50007-6
12. Alobaydi Dh., Mohamed H., Attya H. The impact of urban structure changes on the airflow speed circulation in historic Karbala, Iraq. *Procedia Engineering*. 2015; 118:670-674. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.501
13. Al Shawabkeh R., Bagaeen S., Al Fugara A'Kif, Hijazi H. The role of land use change in developing city spatial models in Jordan: The case of the Irbid master plan (1970–2017). *Alexandria Engineering Journal*. 2019; 58(3):861-875. DOI: 10.1016/j.aej.2019.08.001
14. Danilina N.V. City's strategy of park-and-ride system planning. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(2):190-195. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.190-195 (rus.).
15. Stanley B. Middle East city networks and the "new urbanism". *Cities*. 2005; 22(3):189-199. DOI: 10.1016/j.cities.2005.03.007
16. Guzmán P.C., Pereira Roders A.R., Colenbrander B.J.F. Measuring links between cultural heritage management and sustainable urban development: An overview of global monitoring tools. *Cities*. 2017; 60:192-201. DOI: 10.1016/j.cities.2016.09.005
17. Ameen R.F.M., Mourshed M., Li H. A critical review of environmental assessment tools for sustainable urban design. *Environmental Impact Assessment Review*. 2015; 55:110-125. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.07.006
18. Dennison N. *Tourism as an anthropological subject in current anthropology*. The university of Chicago, 1981; 461.
19. Shevchenko E., Danilina N. Historical settlement systems as strategic vector of Russian federation development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 451:012152. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012152
20. Chang H.-H., Huang W.-C. Application of a quantification SWOT analytical method. *Mathematical and Computer Modelling*. 2006; 43(1-2):158-169. DOI: 10.1016/j.mcm.2005.08.016

Received April 20, 2020.

Adopted in a revised form on May 21, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: **Raeda Al-Daini** — postgraduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6436-9067; grado@mgsu.ru;

Asadi Samaneh — postgraduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

Nina V. Danilina — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8945-2217, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435; grado@mgsu.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Levin N., Ali S., Crandal D., Kark S. World heritage in danger: Big data and remote sensing can help protect sites in conflict zones // *Global Environmental Change*. 2019. Vol. 55. Pp. 97–104. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.02.001
2. Shafik S., Aly A. Modernization and regionalism: Approaches for sustainable revival of local urban identity // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 21. Pp. 503–512. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2044

3. Bertacchini E., Segre G. Introduction: Culture, sustainable development and social quality: A paradigm shift in the economic analysis of cultural production and heritage conservation // *City, Culture and Society*. 2016. Vol. 7. Issue 2. Pp. 69–70. DOI: 10.1016/j.ccs.2015.12.007
4. Trillo C., Petti L. A novel paradigm to achieve sustainable regeneration in historical centres with cultural heritage // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 223. Pp. 693–697. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.243
5. Belal A., Shcherbina E. Heritage in post-war period challenges and solutions // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. Issue 25. Pp. 252–257. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.491
6. Al-Janaby S.H. City center and impact on the urban complex // *Journal of the Iraqi. Geographical Society*. 1985. Vol. 16. Pp. 46.
7. Alateby A.S. Tourism and recreation in the state of Kuwait (geographic study) // *Journal of Gulf Studies and Arabia*. 2002. Vol. 107. Pp. 155.
8. Hutchinson F.P., Herborn P.J. Landscapes for peace: A case study of active learning about urban environments and the future // *Future*. 2012. Vol. 44. Issue 1. Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.futures.2011.08.004
9. Mohammed H., Amin T.M. The impact of heritage decline on urban social life // *Journal of Environmental Psychology*. 2018. Vol. 55. Pp. 34–47. DOI: 10.1016/j.jenvp.2017.12.002
10. Romeo E., Morezzi E., Rudiero R. Industrial heritage: Reflections on the use compatibility of cultural sustainability and energy efficiency // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 1305–1310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.145
11. Savory R.M. The religious environment in the Middle East // *Business and the Middle East*. 1982. Pp. 1–38. DOI: 10.1016/b978-0-08-025992-5.50007-6
12. Alobaydi Dh., Mohamed H., Attya H. The impact of urban structure changes on the airflow speed circulation in historic Karbala, Iraq // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 118. Pp. 670–674. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.501
13. Al Shawabkeh R., Bagaeen S., Al_Fugara A'Kif, Hijazi H. The role of land use change in developing city spatial models in Jordan: The case of the Irbid master plan (1970–2017) // *Alexandria Engineering Journal*. 2019. Vol. 58. Issue 3. Pp. 861–875. DOI: 10.1016/j.aej.2019.08.001
14. Данилина Н.В. Городское стратегическое планирование системы перехватывающих стоянок // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 2 (113). С. 190–195. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.190-195
15. Stanley B. Middle East city networks and the “new urbanism” // *Cities*. 2005. Vol. 22. Issue 3. Pp. 189–199. DOI: 10.1016/j.cities.2005.03.007
16. Guzmán P.C., Pereira Roders A.R., Colenbrander B.J.F. Measuring links between cultural heritage management and sustainable urban development: An overview of global monitoring tools // *Cities*. 2017. Vol. 60. Pp. 192–201. DOI: 10.1016/j.cities.2016.09.005
17. Ameen R.F.M., Mourshed M., Li H. A critical review of environmental assessment tools for sustainable urban design // *Environmental Impact Assessment Review*. 2015. Vol. 55. Pp. 110–125. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.07.006
18. Dennison N. Tourism as an anthropological subject in current anthropology. The university of Chicago, 1981. 461 p.
19. Shevchenko E., Danilina N. Historical settlement systems as strategic vector of Russian federation development // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 451. P. 012152. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012152
20. Chang H.-H., Huang W.-C. Application of a quantification SWOT analytical method // *Mathematical and Computer Modelling*. 2006. Vol. 43. Issue 1–2. Pp. 158–169. DOI: 10.1016/j.mcm.2005.08.016

Поступила в редакцию 20 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 21 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Разда Ал-Дайни — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-6436-9067; grado@mgsu.ru;

Асади Саманех — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru;

Нина Васильевна Данилина — доктор технических наук, заведующая кафедрой градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8945-2217, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435; grado@mgsu.ru.

Этапы социализации индустриального наследия в Москве

Д.Д. Попова

Московский архитектурный институт (Государственная академия) (МАРХИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена актуальная тенденция создания на базе индустриальных объектов и территорий общественной архитектурно-пространственной среды, которая в данной статье определена термином «социализация». Цель работы состоит в выделении и характеристике этапов социализации индустриального наследия Москвы (процесс начался в столице с середины 1990-х гг.). Систематизация накопленного опыта в данной области позволяет сформулировать перспективные модели интеграции территорий исторической индустриальной застройки в городской контекст.

Материалы и методы. Для анализа были отобраны 14 характерных примеров реновации исторических промышленных территорий в Москве. Систематизированы материалы по истории преобразования данных территорий. Проведен социально-экономический анализ отдельных исследуемых объектов и графоаналитический анализ проявляющейся кластеризации общественных пространств в исторических промышленных районах.

Результаты. На основе 14 примеров были выделены три этапа социализации: начальный, целенаправленный и системный. Этапы соответствуют хронологии появления общественных пространств на базе территориальных образований объектов индустриального наследия. Отмечена динамика возникновения общественной среды на индустриальных территориях — от естественного социального освоения, поискового к целенаправленному, когда принцип открытости и общедоступности закладывается проектом. Третий, системный этап, ориентированный на сохранение исторических промышленных территорий как комплекса и предполагающий создание на основе опорной индустриальной застройки системы общественных пространств, представляется перспективным направлением для создания уникальной городской среды.

Выводы. Выделена определяющая роль создания общественных пространств в процессе реновации индустриального наследия. Приведены закономерности расположения преобразованных исторических промышленных территорий относительно центра Москвы, сопоставлены площади освоения, стоимость недвижимости в границах рассматриваемых территорий (аренда офисов и покупка жилья) и на прилегающих территориях. Сделан вывод о социальной доступности территорий и обозначены перспективы развития общественных пространств на базе индустриального наследия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индустриальное наследие, социализация индустриального наследия, общественные пространства, система общественных пространств, кластеры общественных пространств, перепрофилирование, интеграция индустриального наследия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попова Д.Д. Этапы социализации индустриального наследия в Москве // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1090–1104. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1090-1104

Stages of industrial heritage socialization in Moscow

Darya D. Popova

Moscow Institute of Architecture (State Academy) (MARKHI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The actual tendency of creation of public architectural and spatial environments using industrial objects as foundation, which in this article is defined by the term “socialization”, is considered. The purpose of this paper is to identify and characterize the stages of socialization of Moscow’s industrial heritage (the process began in the mid-1990s). The systematization of accumulated experience in this field allows for the formulation of perspective integration models for territories of historical industrial development into urban surroundings.

Materials and methods. 14 typical examples of renovation of historical industrial territories in Moscow were selected to be analyzed. Materials on the history of transfiguration of these areas have been systematized. Socioeconomic analysis of separate investigated objects and graph-analytical analysis of manifesting clustering of public spaces in historical industrial areas were conducted.

Results. Three stages of socialization were identified on the basis of 14 examples: initial stage, focused stage and systematic stage. The stages correspond to the key dates of appearance of public spaces on the foundation of industrial heritage territorial formations. Dynamics of appearance of the public environment on industrial territories, from natural social development to the focused stage in which the principles of openness and public availability are set by a project, is noted. The third, systematic stage, which is focused on the preservation of historical industrial territories as a complex and involving the creation of a system of public spaces on the basis of conserving the historical industrial developments, is a promising direction for the creation of a unique urban environment.

Conclusions. The defining role of the creation of public spaces in the process of industrial heritage renovation has been identified. The regular patterns of the location of the converted historical industrial areas relative to the center of Moscow

are given, and the development areas, as well as real estate value within the boundaries of the areas under consideration (office rent and housing purchase) and on the adjacent territories are compared. The conclusion about social accessibility of territories is made, and the prospects of development of public spaces on the foundation of industrial heritage are outlined.

KEYWORDS: industrial heritage, industrial heritage socialization, public spaces, public space system, public space clusters, conversion, industrial heritage integration

FOR CITATION: Popova D.D. Stages of industrial heritage socialization in Moscow. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1090-1104. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1090-1104 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Создание общественных пространств на базе территориальных образований объектов индустриального наследия — широко распространенное явление в современных городах.

Проблема сохранения и использования потенциала архитектурного промышленного наследия обострилась в середине XX в. В это время в Великобритании развернулось активное общественное движение за сохранение памятников индустриальной культуры, которое привело к организации первого международного конгресса по вопросам сохранения индустриальных памятников в 1973 г. и образованию Международного комитета по сохранению промышленного наследия ТИССИН в 1978 г.; появлению самостоятельной дисциплины — «индустриальная археология». В тот же период в Америке освоение бывших производственных площадей было связано с альтернативным культурным движением (Фабрика Энди Уорхорла, 1964 г.) [1]. Позже такие «культурные фабрики» появляются и в Европе: «можно упомянуть Die Fabrik в Гамбурге и зал Schaerbeek под Брюсселем, основанные в 1971 и 1972 годах, UfaFabrik в Берлине в 1979 году или Rote Fabrik в Цюрихе, созданную в 1980 году» [1].

Процессы целенаправленной регенерации исторической промышленной среды в Европе обозначились в 1980–1990-е годы, когда невостребованные в хозяйственной сфере индустриальные комплексы стали рассматриваться как территории перспективного развития [2]. В это время разворачиваются масштабные проекты в Манчестере, Ливерпуле, Лондоне, Генуе, Гамбурге, Марселе и других городах. В 1989–1999 гг. проходит Международная строительная выставка (IBA) Emscher Park, задавшая стимул культурной трансформации всего Рурского региона.

Параллельно с тенденцией регенерации исторических территорий набирала популярность концепция устойчивого развития, в контексте которой сохраняемое наследие может быть рассмотрено как ресурс (embodied energy — «воплощенная или сохраненная энергия») [3].

В ряде исследований термин «социализация» уже употреблялся в контексте реновации исторических производственных территорий: А.Ю. Анохин [4] называет социализацию пространства одной из задач ревитализации, рассматриваемой как процесс вос-

создания, оживления и восстановления городского пространства. В статье В.П. Уренёва, Н.О. Дмитрика [5] социализация промышленного объекта с учетом окружающей городской среды выделяется как одна из градостроительных задач. Т.О. Цитман, А.В. Богатырева [6] определяют социализацию территории как инструмент (метод) создания больших рекреационных зон. В Методических рекомендациях в рамках реализации Приоритетной программы «Комплексное развитие моногородов» социализация пространства выступает одной из целей ревитализации бывших промышленных объектов¹.

Под социализацией в данной статье понимается процесс активизации взаимодействия общества с объектами индустриальной культуры, в частности — индустриальным наследием: создание на базе индустриальных объектов и территорий общественной архитектурно-пространственной среды.

Современное представление об общественных пространствах (ОП) сводится к многочисленному ряду определений внутри различных научных областей. Типология ОП постоянно расширяется за счет новых архитектурно-пространственных и градостроительных решений, изменений в социальном взаимодействии, культурных трансформаций. Актуальность вопроса не вызывает сомнений.

Общественные пространства согласно материалам доклада Habitat III относятся к городским общественным ресурсам. Раньше к общественным ресурсам относились элементы окружающей природной среды, а сегодня они расширены за счет общественных благ. Формирование общественных пространств «для максимизации общих ценностей» определяется самостоятельным термином, более распространенным в англоязычном варианте, — place-making (формирование мест). Акцентируется внимание к культурным и социальным характеристикам места².

¹ Ревитализация территорий промышленных объектов: Методические рекомендации по реализации проектов повышения качества среды моногородов. Дом. РФ, ВЭБ: Фонд развития моногородов, Strelka KB. URL: http://minjkh_old.donland.ru/Data/Sites/5/media/docs/gorsreda/metod/ревитализация-территорий-промышленных-объектов.pdf (дата обращения: 05.06.2020).

² Habitat III. Исследовательские доклады. 11 — Общественное пространство. Нью-Йорк, 31 Мая 2015. URL: http://habitat3.org/wp-content/uploads/11-Habitat-III-Issue-Paper-11_Public-Space_rus-AI_fin.pdf (дата обращения: 05.06.2020).

Как отмечает Г. Ревзин, общественное пространство позволяет выделить самостоятельную функцию, обусловленную актуальными социальными потребностями и процессами: «...общественные пространства — это места неопределенной функции, не созревшей»³. В контексте реорганизации индустриальной застройки необходимость задания вектора изначальной неопределенности может быть обеспечена созданием ОП.

В развитии общественных пространств важной характеристикой выступает параметр их доступности. Сугубая коммерциализация проекта исключает возможность социальной интеграции². В отношении процессов преобразования индустриального наследия переориентация закрытого состояния территории в открытое является конечным результатом интеграции⁴.

Возвращаясь к проблеме социализации индустриального наследия, следует отметить, что ряд современных авторов рассматривает сохранение исторических объектов как устойчивую основу инновационного развития, ресурс [7], требующий не только сохранения, но и нового использования. Как пишет С.Б. Смит: «Переход от чистого рассмотрения памятников к культурно значимым процессам и мероприятиям, вероятно, является самой большой проблемой для ТИССИН, ICOMOS и ЮНЕСКО» [8].

Оценка архитектурно-градостроительных, конструктивных, планировочных возможностей сохраняемого объекта и соответствие их новому функциональному наполнению — вопросы, находящие методические решения в статьях отечественных и зарубежных исследователей [9–11]. Эффективность проекта реновации, впрочем, не складывается лишь из предложения новых функций, предпочтение которых среди пользователей не всегда определено [12]. Все более осознается важность развития среды и раскрытия ее идентичности для публики [13]. Определяющую роль ОП в стратегии преобразования территорий индустриальной застройки выделяют исследователи А. Влодарчик [14], Н. Коссонс [15], М. Прайте [2].

М. Прайте отмечает настоящий старт городской регенерации в новом использовании территории в качестве общественного пространства: городская регенерация начинается скорее с перепланирования «пространств», чем с преобразования «объемов» [2]. Насыщенная общественной деятельностью преобразованная промышленная среда

расширяет границы представлений о городских центрах [16, 17].

Гипотезой исследования является тезис: общественное пространство (социализация) определяет процесс преобразования районов исторической индустриальной застройки.

В России преобразование индустриального наследия под социальные нужды, «раскрытие» территорий происходило с середины 1990-х годов преимущественно в столице и крупных городах. В начале движения выделялись Москва, Санкт-Петербург и города Урала (здесь основным ресурсом сохранения памятников индустриального наследия была определена музеефикация [18]). Но наибольшим числом и вариативностью подходов приспособления и архитектурно-градостроительной интеграции отличается все же Москва.

За два десятилетия интенсивно протекающего процесса можно проследить эволюцию, выделить определенные этапы и закономерности, а также обозначить перспективы дальнейшего процесса социализации исторической индустриальной застройки в Москве.

Потребность в формализации существующего опыта перепрофилирования отразилась в появлении трудов (публикаций в популярных и профессиональных СМИ), фиксирующих хронологию реновации московских промышленных территорий. В 2006 г. в журнале «Проект Россия» (№ 40) было изложено обобщение существующего на тот момент опыта преобразования промышленных территорий⁵. В 2018 г. городская интернет-газета The Village выпустила обзорную статью «Прошлое, настоящее и будущее московских промзон», охватывающую период с 1914 по 2017 гг.⁶

Таким образом, изучение вопросов эволюции, становления, выделения характеристик этапов трансформации промышленных образований, анализ их архитектурно-градостроительной роли — перспективные направления архитектурных исследований.

Настоящая статья рассматривает явление социализации районов исторической промышленной застройки Москвы в контексте преобразования территорий индустриального наследия. Целью статьи является выделение и характеристика этапов соци-

³ Ревзин Г. Место неопределенных функций // Strelka Mag. 2017. URL: <https://strelkamag.com/ru/article/grigory-revzin-about-public-spaces> (дата обращения: 05.06.2020).

⁴ Штиглиц М.С. Промышленная архитектура Санкт-Петербурга XVIII — первой половины XX в.: Историко-культурные проблемы : дис. ... д-ра арх. СПб, 2002. 358 с.

⁵ Муратов А., Змеул А. Лишняя архитектура, или Пром в эпоху деиндустриализации // Проект Россия. 2006. № 40. URL: <https://prorus.ru/interviews/lishnyaya-arhitektura-ili-prom-v-epohu-deindustrializacii/> (дата обращения: 05.06.2020).

⁶ Левченко Л. Прошлое, настоящее и будущее московских промзон // The Village: городская интернет-газета. URL: https://www.the-village.ru/village/city/public-space/301849-promzony?utm_source=facebook.com&utm_medium=social&utm_campaign=podrobno-rasskazyvaem-o-tom--chem-byli-i&utm_content=18015354 (дата обращения: 05.06.2020).

лизации на основании анализа 14 примеров реновации исторических промышленных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью определения генезиса социализации территорий исторической промышленной застройки было проведено исследование 13 таких территорий в Москве, преобразованных в период с 1995 г. по настоящее время и прошедших различные пути трансформации (рис. 1). 14-й комплекс включен как проект (преобразование территории бывшего завода «Знамя Труда» [19]) — перспектива новой архитектурно-градостроительной формации, которая может открыть новый этап (системный) социализации индустриального наследия.

Материалы, отражающие историю преобразования отдельных промышленных объектов и комплексов, принятие ключевых решений по их развитию, были отобраны и систематизированы.

Был произведен социально-экономический анализ данных территорий:

- выделены основные функциональные модели перепрофилирования зданий (материалы официальных интернет-страниц бизнес-центров, девелоперских компаний, профессиональных изданий);
- определена стоимость аренды 1 м² офисной недвижимости и покупки жилой (на территории исследуемых образований, на прилегающих территориях в радиусе 500 м (преимущественно — по открытым данным сервиса «Яндекс.Недвижимость»));
- обозначены зависимости между расположением объекта относительно центра и его стоимостью, отношения между стоимостью в границах преобразованных территорий и стоимостью близлежащих офисов и (или) жилья. Принимая во внимание возможные колебания стоимостных показателей, экономический анализ был ограничен фиксированной датой — 05.06.2020;
- рассмотрен характер и результаты (в том числе — потенциальные) формирования общественной среды на 14 территориях;
- путем графического анализа выделены три социальных кластера из нескольких ОП на Базе территориальных образований объектов индустриального наследия (ТООИН) в Москве.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В число исследуемых территорий вошло 14 позиций, начиная от самых ранних проектов преобразований (культурно-деловой и жилищный комплекс «Голутвинская слобода», 1995 г.) до реализуемых в настоящий момент крупных проектов реконструкции территории заводов АМО ЗИЛ и «Серп и Молот». Все 14 примеров отмечены на схеме (рис. 1) и представлены табл. 1.

Табл. 1. Исследуемые территории исторической промышленной застройки Москвы

Table 1. The studied historical industrial development areas in Moscow

№	Наименование	Name
1	Музей современного искусства ГЭС-2	Museum of Contemporary Art GES-2
2	Культурно-деловой и жилищный комплекс «Голутвинская слобода»	Cultural-business and housing complex “Golutvinskaya Sloboda”
3	Арт-кластер «Красный Октябрь»	Art cluster “Red October”
4	Бизнес-центр «Фабрика Станиславского»	Business Center “Stanislavsky Factory”
5	Центр современного искусства «Винзавод»	Center for Contemporary Art “Winzavod”
6	Центр дизайна Artplay	Design Center Artplay
7	Бизнес-квартал «Арма»	Business quarter “Arma”
8	Деловой квартал «Красная Роза»	Business quarter “Red Rose”
9	Реконструкция территории завода «Серп и Молот»	Reconstruction of the territory of the factory “Serp I Molot”
10	Культурно-деловой комплекс «Большевик»	Cultural and business complex “Bolshevik”
11	ОСТФ «Знамя Труда» (проект)	PSTF (public socio-tech-noforum) “Znamya Truda” (project)
12	Дизайн-завод «Флакон»	Design factory “Flacon”
13	Городское общественное пространство «Хлебозавод»	City public space “Khlebozavod”
14	Реконструкция территории завода АМО ЗИЛ	Reconstruction of the territory of the ZIL plant

На основе рассмотренных примеров предлагается выделить *три этапа социализации: начального, целенаправленного и системного*, соответствующих хронологии появления ОП на базе ТООИН.

В отношении всех рассматриваемых примеров был проведен экономический анализ, характеризующий доступность предложения офисной и жилой недвижимости для потенциальных арендаторов и жильцов — в границах исследуемых территорий и на близлежащих территориях (в радиусе $R = 500$ м). Чтобы определить, могут ли данные территории физически быть включены в систему городского центра, было рассчитано расстояние территорий от центра.

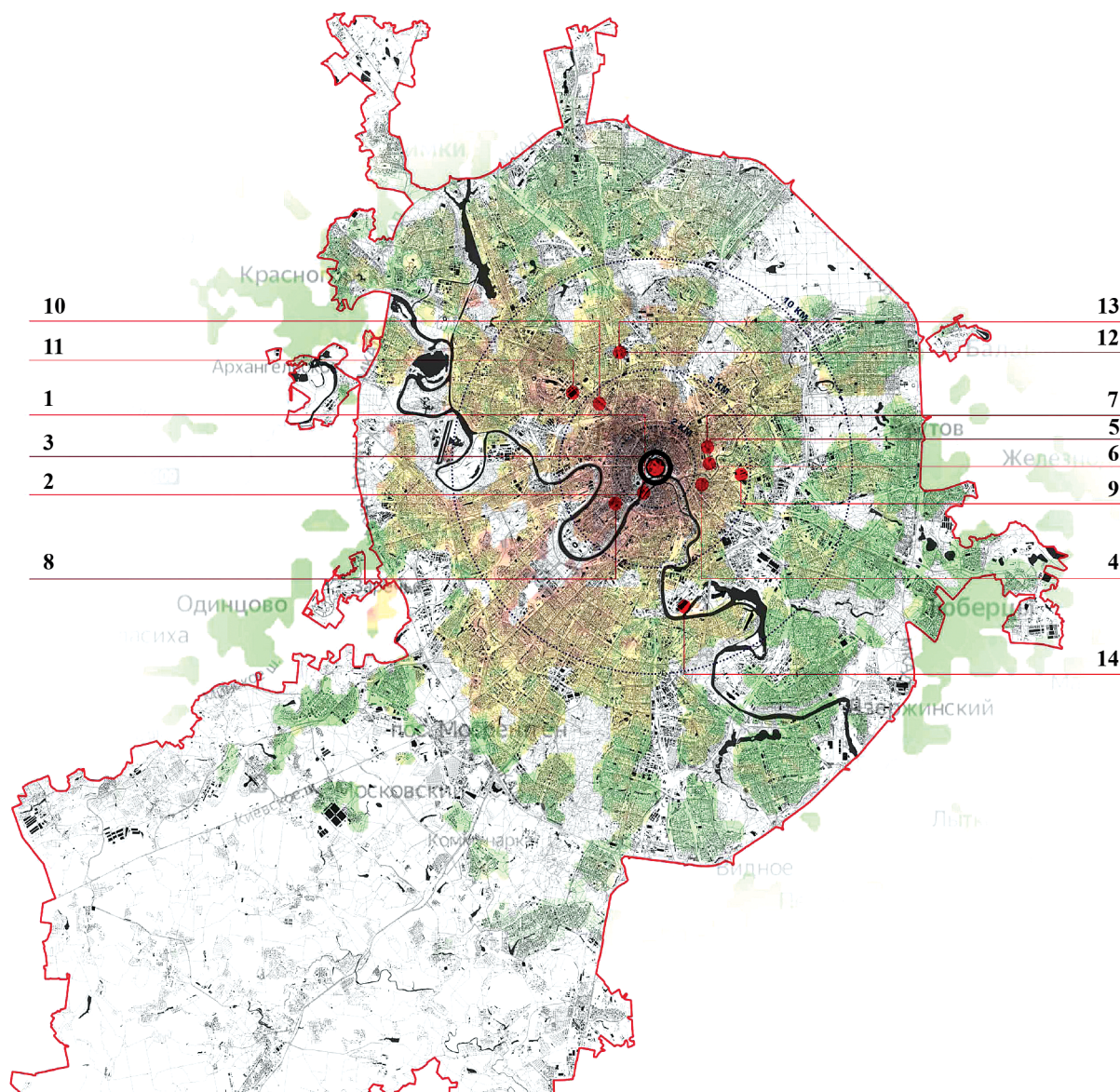


Рис. 1. Размещение исследуемых территорий исторической промышленной застройки Москвы⁷: 1 — Музей современного искусства ГЭС-2; 2 — культурно-деловой и жилищный комплекс «Голутвинская слобода»; 3 — арт-кластер «Красный Октябрь»; 4 — бизнес-центр «Фабрика Станиславского»; 5 — Центр современного искусства «Винзавод»; 6 — Центр дизайна Artplay; 7 — бизнес-квартал «Арма»; 8 — деловой квартал «Красная Роза»; 9 — реконструкция территории завода «Серп и Молот»; 10 — культурно-деловой комплекс «Большевик»; 11 — общедоступный социотехнофорум (ОСТФ) «Знамя Труда» (проект); 12 — Дизайн-завод «Флакон»; 13 — городское общественное пространство «Хлебозавод»; 14 — реконструкция территории завода АМО ЗИЛ

Fig. 1. The location of studied historical industrial development areas in Moscow⁷: 1 — GES-2 Museum of Modern Art; 2 — Golutvinskaya Sloboda social, business and housing complex; 3 — Krasny Oktyabr' art cluster; 4 — Fabrika Stanislavskogo business center; 5 — Winzavod center for contemporary arts; 6 — Artplay design center; 7 — Arma business district; 8 — Krasnaya Roza business district; 9 — Serp i Molot factory territory renovation; 10 — Bolshevik social and business complex; 11 — Znamya Truda public social and technological forum (project); 12 — Flakon design factory; 13 — Khlebozavod civic space; 14 — AMO ZIL plant territory renovation

⁷ Цвета карты показывают, сколько стоит в среднем 1 м² жилья: от низкой стоимости (зеленый цвет) до высокой (красный цвет). Рассчитано на основе данных из объявлений, опубликованных за последний год на портале «Яндекс.Недвижимость»

The map colors show how much an average 1 m² of housing costs: from low cost (green) to high cost (red). Calculated based on data from ads published over the past year on the Yandex portal.Realty

Результаты проведенного экономического анализа по стоимости аренды офисной и покупки жилой недвижимости, расстояния от центра представлены на рис. 2.

Для выявления масштабных закономерностей были выделены площади реорганизуемых зон. Диаграмма площадей территорий и их принадлежность к этапам социализации изображены на рис. 3.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов социализации индустриального наследия в Москве.

1. Начальный (1990-е – начало 2000-х гг.).

Определяется поиском оптимальных моделей развития территорий, разнообразием подходов: коммерчески ориентированные проекты по строительству жилых и общественных зданий существуют параллельно с культурным и творческим, «есте-

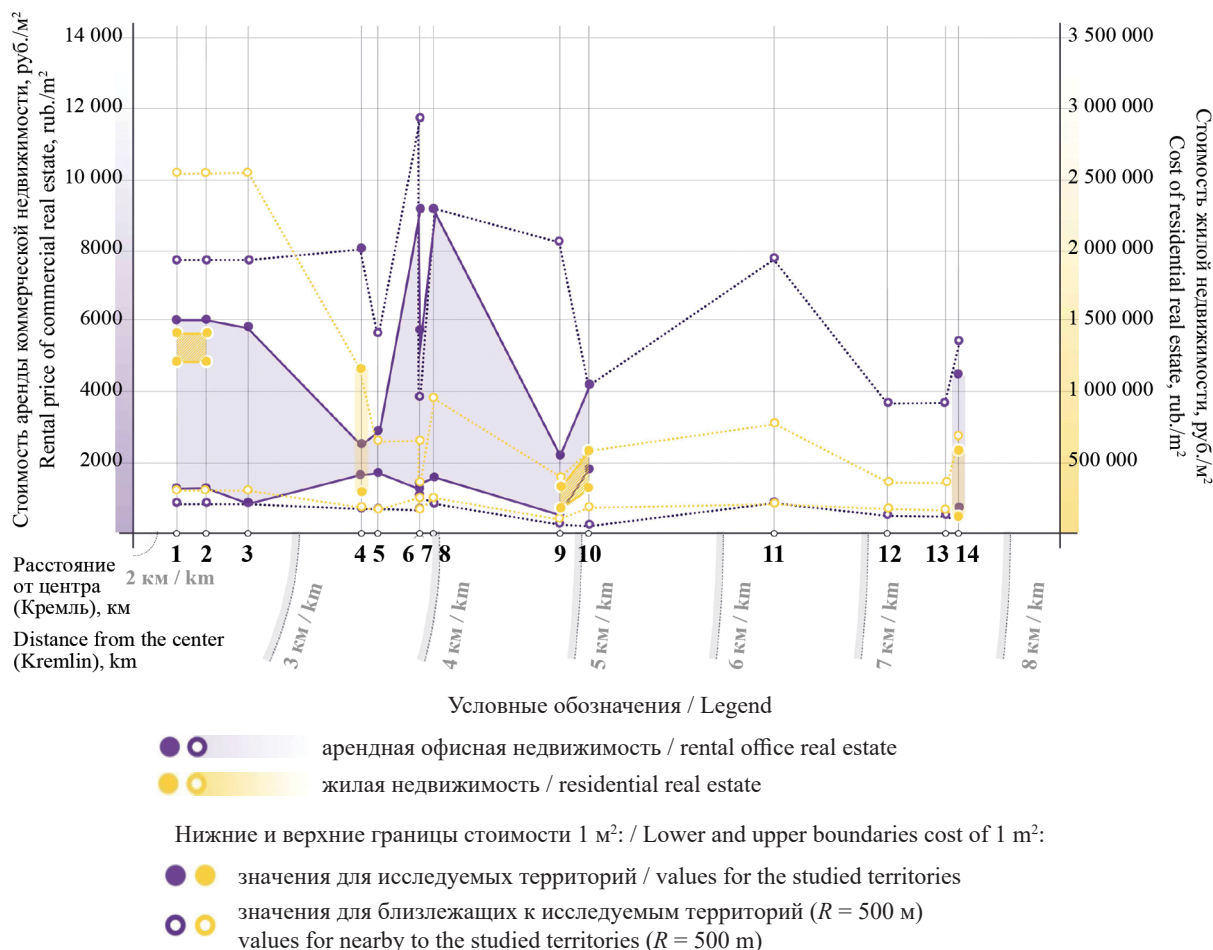


Рис. 2. Анализ стоимости 1 м² офисной (аренда) и жилой (покупка) недвижимости на исследуемых территориях исторической промышленной застройки и на прилегающих территориях в радиусе 500 м (В исследовании использованы данные стоимости 1 м² покупки жилой и аренды офисной недвижимости от Яндекс.Недвижимость (05.06.2020))

Fig. 2. Analysis of the cost of 1 m² of office (rent) and residential (purchase) real estate in the studied areas of historical industrial developments and neighboring areas within the 500 m radius (The study used data on the cost of 1 m² of purchase of residential and office property leases from Yandex.Nedvizhimost (06/05/2020))

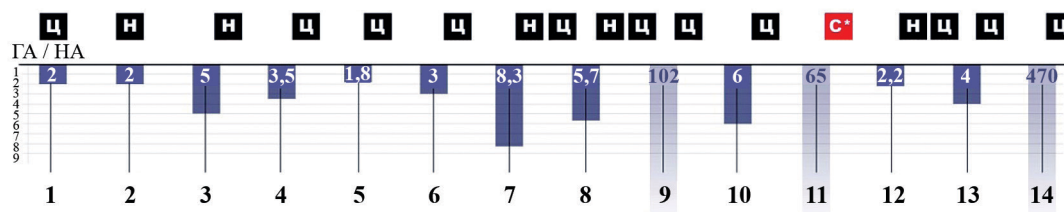


Рис. 3. Диаграмма площадей исследуемых территорий (территории представлены в порядке удаления от центра). Этапы социализации исследуемых территорий: «Н» — начальный; «Ц» — целенаправленный; «С*» — системный

Fig. 3. Studied territory areas diagram (territories are presented in the order of their distance from the center). Socialization stages for studied areas: “Н” — initial; “Ц” — focused; “С*” — systematic

ственным» освоением фабрик, приспособлением их под студии и мастерские. Завершенные проекты редевелопмента единичны («Голутвинская слобода»). Неоконченная или не начатая фаза таких проектов переходит в фазу «естественного» социального освоения пространства, когда заполнение среды востребованными видами общественной активности начинает определять ее дальнейшее развитие («Красный Октябрь», «Флакон»).

Общественная среда формируется последовательно, социальные модели использования динамичны («Красная Роза», «Красный Октябрь»). Приводя первые примеры преобразования московских фабрик и заводов («Винзавод», «Красная Роза», «Красный Октябрь»), В.В. Запарий отмечает: «Реализация всех этих проектов носит во многом спонтанный, рефлекторный характер» [20].

Реализация первого крупного проекта преобразования индустриального наследия связана с территорией бывшей фабрики «Красные текстильщики», на базе которой был создан деловой и жилищный комплекс «Голутвинская слобода» (концепция реконструкции разрабатывалась с 1995 г.)⁸.

Другая модель перепрофилирования представляет преобразование индустриального квартала фабрики «Красная Роза»^{9,10,11}, расположенного между улицами Льва Толстого и Тимура Фрунзе. В бывшем красильном цехе фабрики «Красная Роза» (общая площадь территории — 6 га) с 2003 г. по 2008 г. размещалась первая резиденция Центра дизайна Artplay — первый опыт создания культурной фабрики в столице. Несмотря на то что первоначальную известность проекту принес именно культурный вектор преобразования, концепция реорганизации территории под деловой комплекс (верхний сегмент коммерческой недвижимости, ориентированной на крупные компании мирового уровня) существовала изначально. Культурный центр рассматривался как временное явление. Практика такого использования (temporary use) широко распространена на Западе. Так, территория была маркирована в го-

родском пространстве как значимый общественный центр.

Очередь потенциальных арендаторов формировалась еще на этапе проектирования. Для имиджа некоторых компаний сохранение индустриальной застройки было принципиальным условием: например, для Lafarge (крупный производитель строительных материалов), Яндекс.

Градостроительная концепция, сформированная девелопером KR Properties совместно с бюро «Сергей Киселев и партнеры», сразу закладывала создание пешеходного бульвара внутри квартала, т.е. пространство проектировалось открытым и доступным для посетителей (один из первых таких проектов в условиях реорганизации территории промышленной застройки). Несмотря на то что такое проектное решение является целенаправленным (второй этап по шкале социализации), новаторский характер проекта «Красная Роза» для Москвы, смена ключевых резидентов, первоначальная известность в роли культурного центра определяют его расположение в первой группе.

Архитектура комплекса формируется контрастом и взаимоинтеграцией исторических и новых корпусов. Важно отметить, что некоторые исторические здания являются ОКН, причем это — объекты гражданской архитектуры (комплекс городской усадьбы Всеволожских). Таким образом, социализация способствует более сложному взаимодействию индустриальной и доиндустриальной истории территории.

В 2008 г. Artplay переехал в новое место — в корпус завода «Манометр» (1970 г.), втрое больший по площади предыдущей локации. Размещение новой резиденции культурного центра в здании поздней советской архитектуры продемонстрировало, что диапазон промышленных структур, которые можно классифицировать как наследие, может быть расширен. На начальном этапе преобразования московских промышленных территорий — это важнейший шаг, расширяющий границы представлений о характере, потенциале и ценности разновременной промышленной среды. Особенно интересна многослойность преобразованного культурного ландшафта нового Artplay — визуальная связь со Спасо-Андрониковым монастырем.

Политика гостеприимства и низких арендных ставок для резидентов сохранилась.

В 2007 г. в радиусе пешеходной доступности (8 мин пешком) от новой резиденции Artplay открывается Центр современного искусства «Винзавод» по проекту А. Бродского. На территории находятся ОКН федерального значения (склады, начало XIX в.) и регионального значения (ансамбль Пивоваренный завод — с 1870-х годов завод «Московская Бавария», с 1886 г. — завод «Русского товарищества пиво-медоварения в Москве», XIX в.).

⁸ Проект «Голутвинская слобода»: Начало // Сайт ГК «Голутвинская слобода». URL: <http://golutvino.ru/proekt-golutvinskaja-sloboda/nachalo/> (дата обращения: 05.06.2020).

⁹ Змеул А. «Архитектурный час» на радио «СИТИ FM». Эфир 7 октября 2006 г. Тема — будущее территории фабрики «Красная Роза» // [archi.ru](http://archi.ru/press/russia/2871/arhitekturnyi-chas-na-radio-siti-fm-efir-7-oktyabrya-2006-g-tema-budushee-territorii-fabriki-krasna-ya-roza). URL: <http://archi.ru/press/russia/2871/arhitekturnyi-chas-na-radio-siti-fm-efir-7-oktyabrya-2006-g-tema-budushee-territorii-fabriki-krasna-ya-roza> (дата обращения: 05.06.2020).

¹⁰ Дом «Яндекса» и «Калашникова» // Официальный сайт KR Properties. URL: <https://www.kr-pro.ru/news/122/> (дата обращения: 05.06.2020).

¹¹ Тарабарина Ю., Коряковская Н. ArtPlay переезжает на Яузу. С расширением // archi.ru. 2008. URL: <https://archi.ru/russia/5956/artplay-pereezhaet-na-yauzu-s-rasshirenem> (дата обращения: 05.06.2020).

В 460 м от «Винзавода» и в 1,2 км от Artplay расположен бизнес-квартал «Арма». История преобразования территории бывшего газового завода начинается с формата культурной фабрики в 2003 г. Существовала угроза утраты ценной промышленной застройки. Работа по приспособлению и реконструкции исторических зданий была начата в 2011 г. архитектурной мастерской «Сергей Киселев и партнеры».

Незапланированное социальное приспособление в той форме, в которой оно «естественно» существует многие годы, часто является следствием кризисных явлений, приводящих к изменению первоначальных коммерческих планов освоения территории.

Территорию «Красного Октября», известную сегодня как арт-кластер, культурное и образовательное городское пространство, изначально предполагалось застроить жильем. В 2003 г. было подписано постановление «О реализации программы “Золотой остров”». Заказчиком тогда выступила компания «КРТ-Мегаполис» (позже лишена статуса заказчика). В настоящее время многофункциональный комплекс «Красный Октябрь» является девелоперским проектом компании «Гута-Девелопмент». Проводились конкурсы на архитектурно-градостроительную концепцию преобразования территории. Кризис 2008 г. препятствовал реализации девелоперского проекта, в связи с чем получила развитие тема арт-кластера — культурной фабрики. В 2009 г. помещения бывшей фабрики (40 000 м²) стали сдавать в трехлетнюю аренду по сверхнизким для центра города ценам — 200–400 долл./м² в год, но с условиями, что ремонтирует помещения сам арендатор. «Если в 2009 г. выручка от аренды составила, по расчетам Forbes, 12 млн долл., то в 2011 г. превысила 30 млн долл.»¹². Тем не менее планы по строительству жилой недвижимости не оставлены. На момент 2013 г. уже было согласовано строительство 25 000 м² недвижимости, 20 000 м² из которых — жилье¹². Параллельно протекающая с этим процессом социализация пространства закрепляет за территорией статус активного городского центра и требует внимания к устоявшейся практике общественного использования.

В 2008–2009 гг. кризис способствовал изменению концепции преобразования территории, известной сегодня как дизайн-завод «Флакон»¹³. Благодаря этому на удалении 7,1 км от центра появился новый тип общественного пространства, объединившего офисы и творческие студии.

¹² Зинченко Г., Абакумова М. Чьи интересы столкнулись на «Красном Октябре» и что из этого выйдет // Forbes. 2013. URL: <https://www.forbes.ru/milliardery/233491-dengi-v-oktyabre> (дата обращения: 05.06.2020).

¹³ Flacon-X : официальный сайт дизайн-завода Flacon. URL: http://flaconx.ru/owner_flacon (дата обращения: 05.06.2020).

2. Целенаправленный (2010-е годы до настоящего времени). В этот период известен уже не только зарубежный опыт работы с исторической промышленной средой, существуют наглядные отечественные примеры. Проекты адаптации территорий с индустриальной застройкой характеризуются комплексным подходом, в рамках которого они рассматриваются как фрагменты городской среды: связующим элементом выступает благоустроенное общественное пространство, которое формируется в проекте целенаправленно.

Многие новые пространства уже на стадии концепции позиционируются как общественные. Таким образом, функция становится переменным, а не определяющим компонентом проекта. В основе проекта — социализация пространства, многослойность, многосложность и чуткость к роли и возможностям наследия в современных реалиях.

Благоустройство территории и необходимость раскрытия пространств для широкой публики, свободной от автомобилей, руководитель британского бюро John McAslan + Partners Джон МакАслан называет одним из правил редевелопмента¹⁴. При рассмотрении проектов, выполненных его бюро для Москвы, — делового центра «Фабрика Станиславского» (2009) и культурно-делового комплекса «Большевик» (2015), значимая роль общественных пространств очевидна. Благоустроенные дворики, предусмотренные для отдыха работников офисов, а также широкого круга посетителей присутствуют в каждом из проектов. Акцент на культурной составляющей преобразованных комплексов усиливается присутствующим в каждом из проектов центром общественного притяжения — театра («Фабрика Станиславского») и музея («Большевик»).

Еще одним проявлением целенаправленного создания общественных пространств при реорганизации промышленной среды является освоение крупных промышленных зон, для которых составляются проекты планировки территорий. Этот процесс в Москве начинается с 2010-х годов. Если в предыдущих ситуациях промышленное наследие является определяющим при создании общественных пространств, то в случае крупных проектов усиливается роль новой застройки, которая существенно преобладает над сохраняемым индустриальным наследием. Особенностью этих проектов является создание общественной среды без строгого сохранения идентичности места, ограничиваясь некоторыми акцентами и аллюзиями.

Реконструкция территории завода АМО ЗИЛ «охватывает площадь около 470 га, включая территорию завода им. Лихачева 333 га. ... В 2014–2025 гг. предусмотрены реконструкция и масштабное строительство, где в общей сложности будет расположе-

¹⁴ Матвеев О. Апартаменты вместо печенья // Мослента. 2016. URL: <https://moslenta.ru/nedvizhimost/bolshevik.htm> (дата обращения: 05.06.2020).

но более 6 млн кв. м зданий и сооружений. ...сохраняемая застройка — 0,1 млн кв. м»¹⁵.

Реконструкция территории завода «Серп и Молот» «предполагает реорганизацию территории в 101,84 га и размещение многофункциональной комплексной застройки общей максимальной площадью порядка 1,55 млн м²»¹⁶. В случае этого проекта процент сохраняемой застройки также существенно уступает новому строительству. На базе одного из сохраняемых зданий будет создан Дом культуры и музыки — городской центр общественного притяжения¹⁷.

Создание новых проектов комплексного преобразования сопровождается продолжающимися процессами трансформации более ранних проектов. Наблюдается тенденция кластеризации общественных пространств, которую можно охарактеризовать как предпосылку системного подхода социализации (третьего этапа).

Расширение зоны влияния ранних общественных центров в промышленных районах можно отметить в трех локациях (рис. 4).

А. Район «Красного Октября».

В 2020 г. в 50 м от завода «Красный Октябрь» ожидается открытие культурного центра ГЭС-2¹⁸ площадью 30,7 тыс. м² на базе памятника архитектуры регионального значения «Центральная электрическая станция городского трамвая», 1904–1908 гг., архитектор В.Н. Башкиров.

Культурный центр будет вмещать три основные функциональные зоны: «Общественное пространство», «Образовательное пространство», «Выставочное пространство». Ожидаемая посещаемость —

¹⁵ Редевелопмент территории бывшего завода АМО ЗИЛ // investmoscow.ru/ : инвестиционный портал города Москвы. URL: <https://investmoscow.ru/city-projects/planned-investment-projects/редевелопмент/редевелопмент-территории-бывшего-завода-амо-зил/>

¹⁶ Редевелопмент территории завода «Серп и Молот» // investmoscow.ru/ : инвестиционный портал города Москвы. URL: <https://investmoscow.ru/city-projects/planned-investment-projects/редевелопмент/редевелопмент-территории-завода-серп-и-молот/>

¹⁷ Постановление (проект) «Об утверждении ППТ ограниченной ул. Золоторожский Вал, проездом Завода Серп и Молот, шоссе Энтузиастов, Проектируемым проездом, 6626, район Лефортово города Москвы (Юго-Восточный административный округ)» // stroi.mos.ru : официальный сайт Комплекса градостроительной политики и строительства города Москвы. URL: <https://stroi.mos.ru/uploads/media/file/0001/36/c65842c5c072e228b63fa2b215c1983223629e6c.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).

¹⁸ В здании ГЭС-2 появится центр современного искусства // mos.ru : официальный сайт Мэра Москвы. 2015. URL: <https://www.mos.ru/news/item/1797073/> (дата обращения: 05.06.2020).

750 тыс. чел. в год (для сравнения — на 2019 г. посещаемость музея современного искусства «Гараж» составила 818 954 чел., Государственную Третьяковскую галерею посетило 2 168 800 чел.¹⁹).

Проектированием художественного пространства занимается архитектурное бюро Ренцо Пьяно. Партнер архитектора, Антонио Белведери, который непосредственно руководит московским проектом, отмечает: «Для нас важно, что у этого проекта социальные цели, это нас особенно подбадривает и подталкивает»²⁰.

Таким образом, общественная среда «Красного Октября» и набережной по фронту «Голутвинской слободы» расширяется в сторону нового культурного центра.

Б. «Флакон» + «Хлебозавод».

В 2017 г. открылся пешеходный доступ на территорию Хлебозавода № 9, расположенного в непосредственной близости к дизайн-заводу «Флакон» (50 м). На официальном сайте «Хлебозавод» позиционирует себя как «живое городское пространство», т.е. социальная идея проекта из начального этапа прочно утверждается в этапе целенаправленном.

Основатель и владелец дизайн-квартала «Флакон» Н. Матушевский отмечает: «...к “Флакону” присоединился “Хлебозавод”, 18 мая этого года [2019] мы отметили их объединение — теперь это одна площадка, площадью более 50 тыс. м².

Правда сегодняшнего дня состоит в том, что нельзя держаться только за недвижимость — городская ткань складывается не только из архитектуры, но и из социальных связей и сценариев пребывания людей, и работать с этими структурообразующими элементами не менее важно, чем со зданиями. Именно поэтому наш особый интерес сегодня вызывает развитие городских пространств как таковых»²¹.

В. Район Курского вокзала.

Близкое расположение «Винзавода», «Армы» и Artplay уже в 2000-х годах закрепило за территорией статус нового культурного центра [16, 21, 22]. «... “Винзавод”, “Арма” и Artplay — все три объекта, находящиеся в шаговой доступности друг от друга, выполняют разные функции, но являются открытыми публичными пространствами, привлекательность которых во многом объясняется архитектурой заводских корпусов» [23]. Концепция Арт-квартала,

¹⁹ Смолев Д. Рейтинг музеев — 2019: как российские музеи борются за посещаемость // The Art Newspaper Russia. 2019. URL: <http://www.theartnewspaper.ru/posts/6932/> (дата обращения: 05.06.2020).

²⁰ Ренцо Пьяно: «Главное, что мне нравится в Москве, — это свет!» [Интервью] // The Art Newspaper Russia. 2015. URL: <http://www.theartnewspaper.ru/posts/2189/> (дата обращения: 05.06.2020).

²¹ Матушевский Н. Ревитализация — это непрерывный осознанный процесс // Speech. 2019. № 23. С. 12.

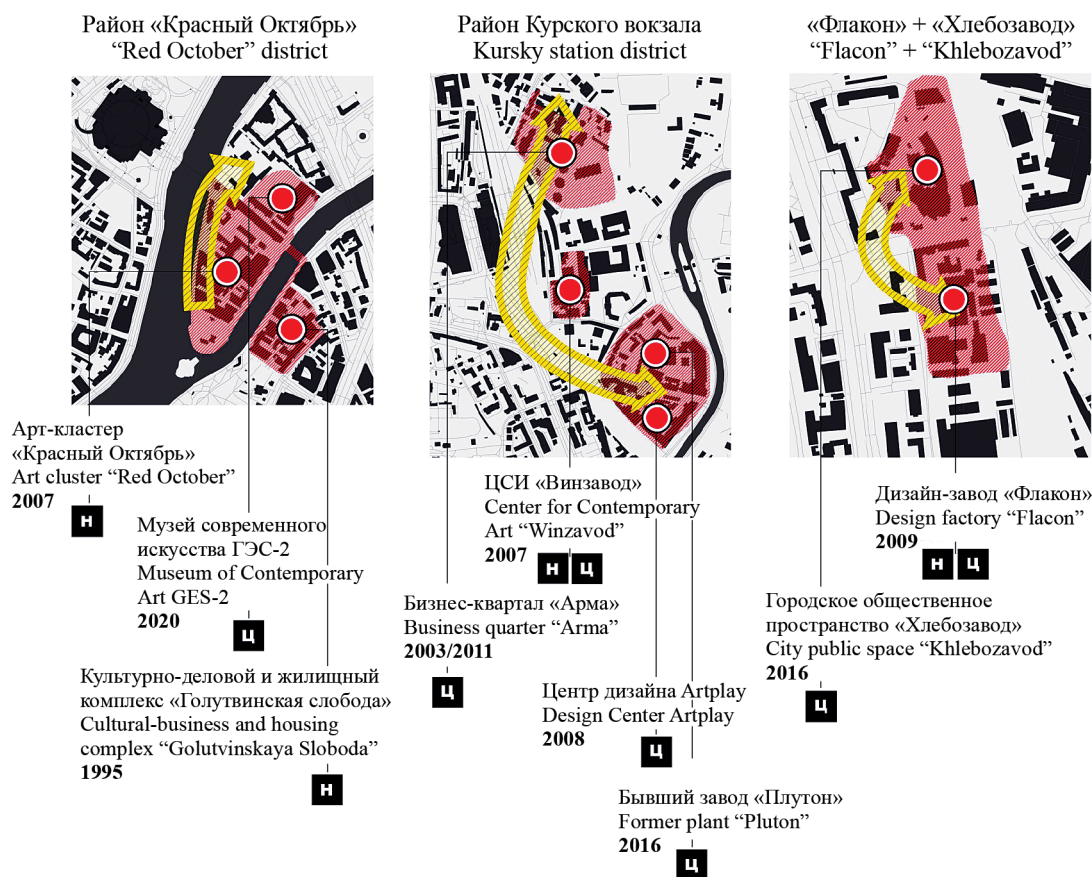


Рис. 4. Тенденция кластеризации общественных пространств на базе районов исторической индустриальной застройки в Москве. Этапы социализации: «Н» — начальный; «Ц» — целенаправленный. Стрелкой обозначено направление кластеризации

Fig. 4. Clustering trends of public spaces on the foundation of historical industrial development areas in Moscow. Socialization stages: “Н” — initial; “Ц” — focused. The clustering direction is indicated with an arrow

внутри которого установились бы более тесные связи между общественными пространствами территорий площадью 510 га, где ядром выступали исторические промышленные центры в районе Курского вокзала, прозвучала еще в 2011 году²². Полностью проект осуществлен не был.

3. Системный. Начало этого этапа можно зафиксировать в конкурсных предложениях и дипломных проектах на примере ОСТФ «Знамя Труда» (дипломные проекты Е. Латыевой, В. Бондаренко, руководитель — профессор Г.Н. Черкасов, начало работы — 2017 г.). Рассматриваются крупные промышленные территории, подчеркивается необходимость сохранения индустриального наследия как комплекса. Проектируется система общественных пространств внутри крупного территориального образования с перспективой интеграции в сеть городских общественных пространств [19, 24].

²² В Москве катастрофически не хватает общественных пространств : Интервью с А. Гриневым // Коммерсант. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2089798> (дата обращения: 05.06.2020).

А.Л. Гельфонд подчеркивает: «При пространственно-временном подходе к выявлению и сохранению объектов культурного наследия главным объектом охраны и использования становится целостная архитектурная среда. Отсюда вытекает понимание наследия как системного образования, в котором отдельные объекты не могут быть сохранены вне их взаимосвязи, причем важная роль в ее организации отводится благоустройству» [25]. Объект сохранения смещается от непосредственно построенных объектов к правилам, которые их сгениерировали [2].

Крупные промышленные комплексы, находясь в структуре активного города, но не настолько близкие к центру как индустриальные кварталы площадью 2...5 га, представляют интерес с точки зрения инновационного развития (например, ОСТФ «Знамя Труда» — 65 га; 6,3 км от центра). Одновременно расширяются функциональные модели преобразования: индустриальное прошлое территории может стать основой организации инновационного производства и размещения офисов высокотехнологичных компаний.

«В последние несколько лет исследователи, изучающие опыт городов, прошедших «полный цикл» джентрификации, говорят о необходимости «реиндустриализации» (*re-industrialization*) городского хозяйства. При этом речь идет не о возвращении к предприятиям эпохи промышленной революции, а скорее, к пересмотру роли и масштаба промышленного производства применительно к потребностям местного сообщества»²³.

В исследовании, проведенном Массачусетским технологическим институтом (MIT) совместно с Университетом Тель-Авива и опубликованном в 2014 г., предложена диаграмма зависимостей между расположением промышленных образований и форматом их функционирования — типологией (речь идет как о современных промышленных предприятиях, так и об исторических) (рис. 5) [26].

Территории, находящиеся дальше от делового центра, позволяют разместить более крупные структуры. В случае завода «Знамя Труда» перспектива сочетания инновационной составляющей — индустриального парка совместно с образованием системы ОП и сохранением индустриального наследия представляет перспективное направление научных исследований и практической реализации, в результате которого создается уникальная для города среда.

²³ Никулина Е. Промышленная застройка Москвы. Осознание ценности // Speech. 2008. № 2. Вторая жизнь. С. 152–165.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования процесса социализации индустриального наследия в Москве можно сделать следующие выводы:

- хотя первые проекты («Голутвинская слобода») оформлялись в виде концепций еще в середине 1990-х гг., фактическое начало интенсивного преобразования индустриальных территорий в Москве можно зафиксировать с начала 2000-х годов. В это время еще не закончился первый (начальный) этап социализации, но уже были заметны предпосылки для второго этапа — целенаправленного;
- половина из 14 рассматриваемых территорий содержит ОКН внутри своих границ, причем речь идет не только о промышленных зданиях: многослойность архитектурного содержания выражается в наличии свидетельств доиндустриального прошлого — объектов гражданской архитектуры. Таким образом, происходит не только интеграция индустриального наследия, но и исторического фрагмента городской застройки в целом, вмещающей все сохранившиеся исторические слои;
- анализируя эволюцию ОП в промышленных районах, можно отметить, что их появление изначально определяло социальную интеграцию этих территорий. Менялся подход создания этих пространств — от начального (поискового) к целена-

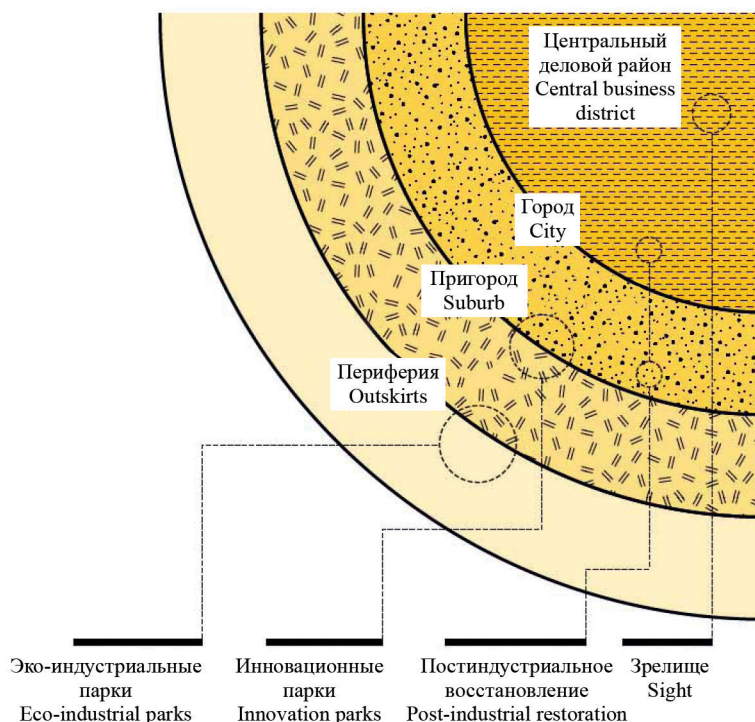


Рис. 5. Существующая типология промышленных образований: программа и география (перевод наименований на русский язык автора) [26]

Fig. 5. Existing typology of industrial entities: program and geography (translation of names into Russian — author) [26]

правленному. Идея ведущей роли социализации оформилась со временем как центральная в создании проектов и не исчерпала перспективы дальнейшего развития (системный этап социализации);

- кластеризация ОП в районах исторической индустриальной застройки (А–В) — заметная тенденция настоящего времени, составляющая предпосылку системного этапа социализации. Появление новых центров рядом с уже существующими приводит к расширению зоны культурного влияния памятников индустриальной архитектуры и усилению их интеграции в городскую среду;

- анализ аренды офисной недвижимости (см. рис. 2) на преобразованных территориях свидетельствует о доступности данной категории для потенциальных арендаторов — редко верхняя граница стоимости окружающих объектов соответствует бывшим индустриальным объектам (исключение составляют престижные бизнес-кварталы: «Фабрика Станиславского», «Большевик», «Арма», классы объектов — В+);

- в отношении продаваемого жилья на рассматриваемых территориях (в тех ситуациях, где оно запроектировано изначально) отмечается его преимущественное расположение в верхнем сегменте по стоимости 1 м² сравнительно с близлежащим окружением ($R = 500$ м) (см. рис. 2). Исключение составляют центрально расположенные территории (район завода «Красный Октябрь»), где стоимость 1 м² самого дорогого жилья в два раза превышает стоимость недвижимости на бывших промышленных территориях. На расстоянии 3...4 км от центра разница между стоимостью жилья на бывшей индустриальной территории и за ее пределами становится менее контрастной;

- преимущественная концентрация преобразованных индустриальных территорий отмечается в районе центра (в среднем, в радиусе 2...4 км), что обусловлено характером развития исторической промышленной застройки: перспективным представляется расширение границ городского центра

и развития системы городских ОП за счет включения территорий исторической промышленной застройки;

- чем дальше от центра, тем крупнее осваиваются территории (бывшие заводы «Серп и Молот» и АМО ЗИЛ находятся на удалении 4,8 и 7,6 км соответственно). Радикально изменяется подход к преобразованию, баланс между сохраняемым индустриальным наследием и новой застройкой — ОП формируется не в историческом контексте, а преимущественно в новых районах, проблема сохранения памятников индустриальной архитектуры обостряется;

- преобразованные территории можно охарактеризовать как социально доступные. Наличие дорогой недвижимости или офисов с режимом пропусков существует параллельно с культурными учреждениями, театрами, музеями — центрами общественного притяжения и открытыми благоустроенными пространствами.

На основе анализа 14 территорий с исторической промышленной застройкой Москвы были выделены три этапа социализации: начальный, целенаправленный и системный. Последний этап существует в виде проектной концепции (общедоступный социотехнофорум «Знамя Труда»). Необходимы дальнейшие теоретические и проектные исследования по его развитию. Освоение крупных промышленных территорий связано с проблематичностью определения ценности позднесоветской застройки, которая составляет образ многих крупных комплексов. Целостное средовое понимание индустриальных образований лежит в основе системной социализации.

Перспективным представляется направление, когда решается одновременно проблема создания общественных пространств и преобразования районов исторической промышленной застройки.

Таким образом, на примере общественных пространств в бывших промышленных районах Москвы была подтверждена гипотеза об определяющей роли социализации в процессе преобразования индустриального наследия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Real E.* Reconversions. L'architecture industrielle réinventée // In Situ. 2015. Issue 26. DOI: 10.4000/insitu.11745
2. *Preite M.* Urban regeneration and planning. Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIN Guide to Industrial Heritage Conservation / ed. by James Douet. London : Routledge, 2016. Pp. 101–109.
3. *Watson M.* Adaptive re-use and embodied energy. Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIN

Guide to Industrial Heritage Conservation / ed. by James Douet. London : Routledge, 2016. Pp. 136–141.

4. *Анохин А.Ю.* Современные технологии ревитализации и реновации объектов историко-культурного наследия // Проблемы, опыт и перспективы развития туризма, сервиса и социокультурной деятельности в России и за рубежом : мат. III Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / отв. ред. О.А. Лях. Чита : Забайкальский государственный университет, 2016. С. 8–21.

5. Уренев В.П., Дмитрик Н.О. Формирование многофункциональных комплексов на основе реновации промышленных объектов // Архитектурный вісник КНУБА. 2016. № 10. С. 336–344.
6. Цитман Т.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 4 (14). С. 29–35.
7. Oevermann H., Mieg H. Nutzbarmachung historischer Industrieareale für die Stadtentwicklung // disP — The Planning Review. 2016. Vol. 52. Issue 1. Pp. 31–41. DOI: 10.1080/02513625.2016.1171045
8. Smith S.B. The work of TICCIN. Industrial heritage Re-Tooled: The TICCIN Guide to Industrial Heritage Conservation / ed. by James Douet. London : Routledge, 2016. Pp. 212–227.
9. Bottero M., D'Alpaos Ch., Oppio A. Ranking of adaptive reuse strategies for abandoned industrial heritage in vulnerable contexts: A multiple criteria decision aiding approach // Sustainability. 2019. Vol. 11. Issue 3. P. 785. DOI: 10.3390/su11030785
10. Liu F., Zhao Q., Yan Y. An approach to assess the value of industrial heritage based on Dempster–Shafer theory // Journal of Cultural Heritage. 2018. Vol. 32. Pp. 210–220. DOI: 10.1016/j.culher.2018.01.011
11. Тутова Л.О. Система оценки промышленной застройки Москвы // Architecture and Modern Information Technologies. 2016. № 1 (34). С. 16.
12. Martinat S., Navratil J., Hollander J.B., Trojan J., Klapka P., Klusacek P. et al. Re-reuse of regenerated brownfields: lessons from an Eastern European post-industrial city // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 188. Pp. 536–545. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.313
13. Gainza X. Industrial spaces for grassroots creative production: spatial, social and planning facets // European Planning Studies. 2018. Vol. 26. Issue 4. Pp. 792–811. DOI: 10.1080/09654313.2018.1425377
14. Włodarczyk A. Planning of open public spaces in the inner-town ex-industrial areas. Swiss example of spatial transformation // Architecture Civil Engineering Environment. 2009. Vol. 2. Issue 1. Pp. 33–40.
15. Cossons N. Why preserve the industrial heritage? Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIN Guide to Industrial Heritage Conservation / edited by James Douet. London: Routledge, 2016. Pp. 6–16.
16. Черкасов Г.Н., Попова Д.Д. Изменение парадигмы образа театра // Архитектура и строительство России. 2018. № 4 (228). С. 34–43.
17. Mansilla J.A., Milano C. Becoming centre: tourism placemaking and space production in two neighborhoods in Barcelona // Tourism Geographies. 2019. Pp. 1–22. DOI: 10.1080/14616688.2019.1571097
18. Курлаев А.Е. Индустриальное наследие в системе охраны и сохранения памятников истории и культуры России: проблемы и перспективы // Российский научный журнал. 2015. № 4 (47). С. 72–79.
19. Латыева Е.В. Конкурсный проект Общедоступного социо-технофорума «Знамя Труда» // Наука, образование и экспериментальное проектирование : сб. тез. Т. 2. М. : МАРХИ, 2020. С. 517–519.
20. Запарий В.В. Общемировые тенденции в изучении, сохранении и реабилитации мирового индустриального наследия // Годы поисков и свершений: кафедра Истории науки и техники УГТУ–УПИ — УрФУ в 1999–2014 гг. : в рамках Пятой ежегодной научной конференции кафедры Истории науки и техники. Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2015. С. 93–108. URL: <http://hdl.handle.net/10995/35672>
21. Черкасов Г.Н. Смещение центра города в районы индустриального наследия: Генуя, Гамбург, Марсель // Наука, образование и экспериментальное проектирование: сборник тезисов. Т. 2. М. : МАРХИ, 2017. С. 470–471.
22. Черкасов Г.Н. Некоторые особенности современной архитектуры // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 4. С. 62–67.
23. Скрипкина Ю.В., Спорышева Е.А. Интеграция промышленных территорий в городскую среду на примере Москвы и зарубежных городов // Молодежь и наука: шаг к успеху : сб. науч. ст. Всеросс. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых: в 3-х т. / ответ. ред. А.А. Горохов. Курск, 2017. С. 97–101.
24. Cherkasov G., Popova D., Tribelskaia E., Suslova O. Preservation and renovation of former plant Znamia Truda in Moscow // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. 2019. DOI: 10.15405/epsbs.2019.12.04.426
25. Гельфонд А.Л. Общественное здание и общественное пространство. Дуализм отношений // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 18–31.
26. Hatuka R., Ben-Joseph E. Industrial urbanism: Places of production. Tel Aviv University, 2014.

Поступила в редакцию 19 июня 2020 г.

Принята в доработанном виде 10 июля 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: Дарья Дмитриевна Попова — аспирант, архитектор; Московский архитектурный институт (Государственная академия) (МАРХИ); 107031, г. Москва, ул. Рождественка, д. 11/4, корп. 1, стр. 4; SPIN-код: 5836-6631; dariapopova@gmail.com.

REFERENCES

1. Real E. Reconversions. L'architecture industrielle réinventée. *In Situ*. 2015; 26. DOI: 10.4000/in-situ.11745
2. Preite M. *Urban regeneration and planning. Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIIH Guide to Industrial Heritage Conservation* / ed. by James Douet. London, Routledge, 2016; 101-109.
3. Watson M. *Adaptive re-use and embodied energy. Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIIH Guide to Industrial Heritage Conservation*. London, Routledge, 2016; 136-141.
4. Anokhin A.Yu. Modern technologies of revitalization and renovation of historical and cultural heritage objects. *Problems, experience and prospects of tourism development, service and socio-cultural activities in Russia and abroad : materials of the III International scientific and practical Internet conference*. Chita, Transbaikal State University, 2016; 8-21. (rus.).
5. Urenev V.P., Dmitrik N.O. Renovation of industrial objects into multifunctional complexes. *Proceedings of the Kyiv National University of Construction and Architecture*. 2016; 10:336-344. (rus.).
6. Tsitman T.O., Bogatyreva A.V. Renovation of the industrial area in the structure of urban environment. *Civil Engineering Bulletin of the Caspian Sea*. 2015; 4(14):29-35. (rus.).
7. Oevermann H., Mieg H. *Nutzbarmachung historischer Industrieareale für die Stadtentwicklung. disP — The Planning Review*. 2016; 52(1):31-41. DOI: 10.1080/02513625.2016.1171045
8. Smith S.B. *The work of TICCIIH. Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIIH Guide to Industrial Heritage Conservation*. London, Routledge, 2016; 212-227.
9. Bottero M., D'Alpaos Ch., Oppio A. Ranking of adaptive reuse strategies for abandoned industrial heritage in vulnerable contexts: A multiple criteria decision aiding approach. *Sustainability*. 2019; 11(3):785. DOI: 10.3390/su11030785
10. Liu F., Zhao Q., Yan Y. An approach to assess the value of industrial heritage based on Dempster-Shafer theory. *Journal of Cultural Heritage*. 2018; 32:210-220. DOI: 10.1016/j.culher.2018.01.011
11. Titova L.O. System of valuable criteria of industrial buildings in Moscow. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2016; 1(34):16. (rus.).
12. Martinat S., Navratil J., Hollander J.B., Trojan J., Klapka P., Klusacek P. et al. Re-reuse of regenerated brownfields: lessons from an Eastern European post-industrial city. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 188:536-545. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.313
13. Gainza X. Industrial spaces for grassroots creative production: spatial, social and planning facets. *European Planning Studies*. 2018; 26(4):792-811. DOI: 10.1080/09654313.2018.1425377
14. Włodarczyk A. Planning of open public spaces in the inner-town ex-industrial areas. Swiss example of spatial transformation. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2009; 2(1):33-40.
15. Cossons N. *Why preserve the industrial heritage? Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIIH Guide to Industrial Heritage Conservation*. London, Routledge, 2016; 6-16.
16. Cherkasov G.N., Popova D.D. Theatre image paradigm shift. *Architecture and Construction of Russia*. 2018; 4(228):34-43. (rus.).
17. Mansilla J.A., Milano C. Becoming centre: tourism placemaking and space production in two neighborhoods in Barcelona. *Tourism Geographies*. 2019; 1-22. DOI: 10.1080/14616688.2019.1571097
18. Kurlayev A.E. Industrial heritage in the system of protection and conservation of monuments of history and culture Russia: problems and prospects. *Russian Scientific Journal*. 2015; 4:74-75. (rus.).
19. Latyeva E.V. Competitive project of Public socio-technoforum "Znamya Truda". *Science, education and experimental design : Abstracts*. Vol. 2. Moscow, MARKHI, 2020; 517-519. (rus.).
20. Zapariy V.V. Global trends in the study, preservation and rehabilitation of the world industrial heritage. *Years of searches and accomplishments: Department of the History of Science and Technology USTU-UPI — UrFU in 1999–2014 : in the framework of the Fifth annual scientific conference of the Department of the History of Science and Technology*. Yekaterinburg, UMC UPI publ., 2015; 93-108. URL: <http://hdl.handle.net/10995/35672> (rus.).
21. Cherkasov G.N. *Displacement of the city center to industrial heritage areas: Genoa, Hamburg, Marseille. Science, education and experimental design: Abstracts*. Vol. 2. Moscow, MARKHI, 2020; 470-471. (rus.).
22. Cherkasov G.N. Some features of contemporary architecture. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 4:62-67. (rus.).
23. Skripkina Yu.V., Sporysheva E.A. Integration of industrial territories into the urban environment on

the example of Moscow and foreign cities. *Youth and science: a step to success : Collection of scientific articles of the All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists: in 3 vol.* Kursk, 2017; 97-101. (rus.).

24. Cherkasov G., Popova D., Tribelskaia E., Suslova O. Preservation and renovation of former plant Znamia Truda in Moscow. *The European Proceedings*

of Social & Behavioural Sciences. 2019. DOI: 10.15405/epsbs.2019.12.04.426

25. Gelfond A.L. Public building and public space. Dualism of relations. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 2:18-31. (rus.).

26. Hatuka R., Ben-Joseph E. *Industrial Urbanism: Places of Production*. Tel Aviv University, 2014.

Received June 19, 2020.

Adopted in a revised form on July 10, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

B I O N O T E S: **Darya D. Popova** — postgraduate student, architect; **Moscow Institute of Architecture (State Academy) (MARKHI)**; build. 4/1, 11/4 Rozhdestvenka st., Moscow, 107031, Russian Federation; SPIN-code: 5836-6631; dariapopowa@gmail.com.

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

УДК 625.14:624.042

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1105-1114

Моделирование анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях

Л.А. Илларионова, А.А. Локтев

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Вследствие динамической нагрузки верхнее строение пути подвергается деформации в течение всего срока строительства и эксплуатации. Настоящая работа посвящена разработке математической модели плиты основания безбалластной конструкции железнодорожного пути общего вида, без привязки к конкретным существующим технологическим решениям используемых подобных элементов. Изучается влияние на динамический прогиб пластинки и контактную силу цилиндрической анизотропии и начальной скорости динамического взаимодействия, фактически приведенной вертикальной компоненты скорости движения состава, возникающей из-за отклонения от проектного положения рельсовой плиты. Предложенная модель позволяет учесть влияние на этот процесс упругих волн, зарождающихся в зоне контакта колеса и рельса и движущихся затем с конечными скоростями. Актуальным вопросом является армирование основной плиты безбалластного пути для предотвращения разрушений в основании плиты.

Материалы и методы. Разработана математическая модель для описания динамического поведения железобетонной плиты безбалластного железнодорожного пути с учетом особенностей приложения нагрузки от колесных пар подвижного состава.

Результаты. Развернутое представление результатов исследования в аналитических выражениях и графических зависимостях динамических и кинематических параметров поведения конструкции может иметь практическое применение при проектировании скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий как в России, так и за границей.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для проведения полноценных исследований динамического поведения основания пути под подвижной нагрузкой, для проверки локальной прочности плиты, испытывающей ударное воздействие, изучения и подбора оптимальных параметров жесткости основания пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, безбалластное основание, упругая волна, математическая модель, динамическая нагрузка, колесная пара, армирование плиты, подбор механических характеристик

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Илларионова Л.А., Локтев А.А. Моделирование анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1105–1114. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1105-1114

Modeling of anisotropic base plate of a ballastless railway track under dynamic influences

Lilia A. Illarionova, Alexey A. Loktev

Russian University of Transport (RUT (MIIT)); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to dynamic loading, the upper structure of the railway track is subject to deformation over the entire construction and operation period. This paper focuses on the development of a mathematical model of the base plate of a general-type ballastless railway track structure without relying on specific existing technological solutions used for such elements. The effect of the actually given vertical component of the rolling stock velocity arising from the deviation from the design position of the long-welded rails on the dynamic deflection of the plate and the contact force of cylindrical anisotropy and the initial rate of dynamic interaction is studied. The proposed model makes it possible to take into account the effect of elastic waves originating in the contact area between the wheel and the rail that move at their final speeds after contact. The actual issue researched in this paper is the reinforcement of the ballastless railway base plate for the prevention of severe damage in the base plate.

Materials and methods. A mathematical model has been developed to describe the dynamic behavior of a reinforced concrete plate of a ballastless railway track taking into account the specifics of load application from rolling stock wheel sets.

Results. Detailed presentation of the research results in the form of analytical expressions and dependence diagrams of dynamic and kinematic parameters of the structure behavior can have practical application when designing rapid transit and high-speed railway lines both in Russia and abroad.

Conclusions. The obtained results can be used for carrying out full-fledged research of dynamic behavior of the track bed under mobile loading, for checking the local durability of plates under shock impact, for researching and selecting optimal rigidity parameters for the track bed.

KEYWORDS: railway, ballastless base, elastic wave, mathematical model, dynamic load, wheel set, plate reinforcement, mechanical characteristics selection

FOR CITATION: Illarionova L.A., Loktev A.A. Modeling of anisotropic base plate of a ballastless railway track under dynamic influences. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1105-1114. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1105-1114 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Система пути на безбалластном основании бывает со сплошным бетонным основанием или опиранием рельс на железобетонную плиту. Разновидность пути на железобетонном сплошном подрельсовом основании не требует предварительной сборки элементов пути. Для фиксации рельса в рабочем положении профили заливаются вокруг бетонной смесью. Вариант опирания рельс на железобетонную плиту заводского изготовления не предполагает дополнительных затрат по выполнению большого объема бетонных работ, а также легче поддается ремонту, а значит, является более экономически выгодным (рис. 1). Объем единовременно вложенных средств при строительстве безбалластного пути компенсируется снижением затрат на содержание и увеличением срока эксплуатации [1, 2].

Под движением колесных пар по железнодорожному пути возникают колебания верхнего строения пути (ВСП), а также вертикальные перемещения точек рельсов [3, 4]. Для уменьшения последствий динамического воздействия от подвижного состава используется конструкция, в которой рельсовая плеть и железобетонная плита основания контактируют через композитный резинокордный наполнитель (рис. 2).

Такая конструкция показала свою эффективность на первых этапах жизненного цикла после ввода железнодорожного пути в эксплуатацию, но имеет существенные недостатки, связанные с ремонтом и устранением образующихся дефектов [5, 6]. Из ремонтной схемы практически исключаются многие работы по текущему содержанию пути, средние, усиленные средние ремонты и т.д. Фактически для замены даже небольшого фрагмента

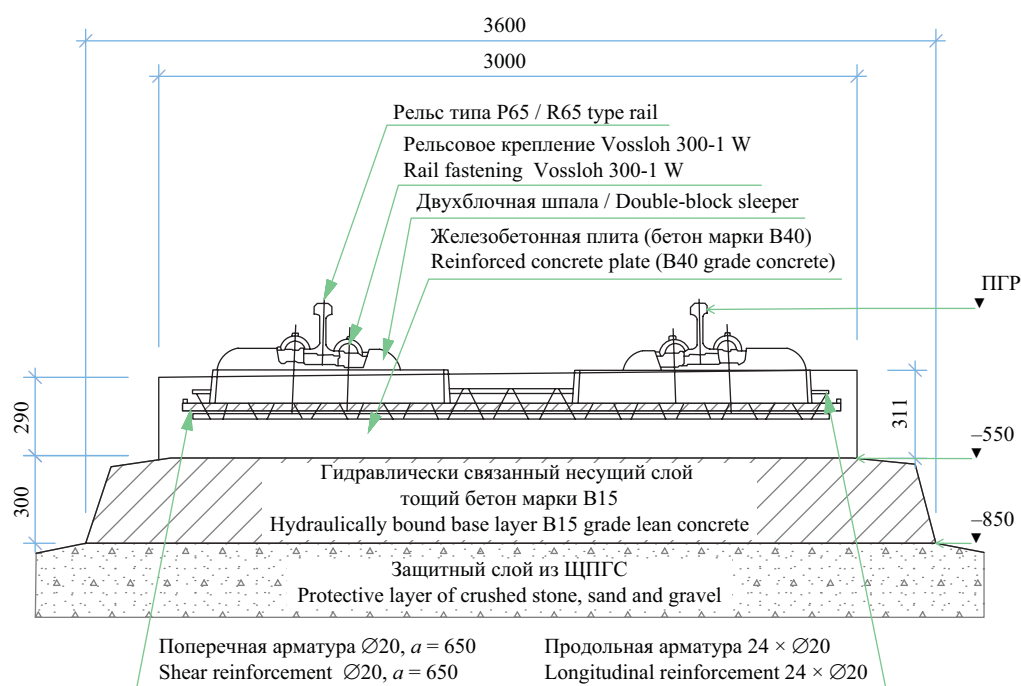


Рис. 1. Путь безбалластной (плитной) конструкции

Fig. 1. The path of a ballastless (slab) structure



Рис. 2. Конструкции безбалластного пути с обрезиненным рельсом: *a* — элемент для трамвайных путей; *b* — элемент для железных дорог с преимущественно пассажирским движением

Fig. 2. Ballastless railway structures with rubber-coated rails: *a* — tramway element; *b* — railway element for railways with predominantly passenger traffic

та отдельных элементов требуется разработка технологических карт ремонтных работ, близких к капитальному ремонту.

При изготовлении конструкции безбалластного пути отдельным и очень актуальным вопросом является армирование основной плиты безбалластного пути и подстилающего бетонного слоя (при необходимости) [5, 7]. В настоящее время используются схемы армирования, характерные для про-

летных конструкций мостовых переходов (рис. 3) или промышленных зданий, в реальности необходимо учитывать особенности железнодорожного пути, связанные с точечным приложением нагрузки от подвижного состава, большим количеством колесных пар, различным режимом движения (скорость следования экипажей, торможение, особенности поведения пути в прямых и кривых участках и т.д.) [8, 9].



Рис. 3. Строительство магистральной железной дороги с применением конструкций безбалластного пути

Fig. 3. Construction of a mainline railway incorporating ballastless railway structures

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе делается попытка разработать математическую модель, описывающую динамическое поведение железобетонной плиты безбалластного железнодорожного пути и учитывающую особенности приложения нагрузки от подвижного состава и ортотропные свойства армированного материала [6, 10, 11].

Движущиеся с конечной скоростью упругие волны приводят к повреждениям элементов ВСП в граничных точках области контакта. Учитывая условие горизонтальности касательной к срединной поверхности плиты, опишем процесс взаимодействия колесной пары и плиты [4, 12]:

$$\begin{aligned} m(\ddot{\alpha} + \ddot{w}) &= -P(t), \\ \rho h \pi r_0^2 \ddot{w} &= 2\pi r_0 Q_r + P(t), \\ \left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_{r=r_0} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В качестве элемента, передающего нагрузку от подвижного состава, выступает колесо пары, имеющее размер опирания на рельсовую плетель $r = r_0$.

Результаты решения предлагается представить в виде аналитических выражений и графических зависимостей.

В случае осесимметричной задачи прямого участка пути без стрелочного перевода и без искусственных сооружений волновые характеристики не зависят от угла θ , при этом уравнения можно записать в данном виде [13, 14]:

$$D_r \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) - D_\theta \frac{\phi}{r^2} + h K G_{rz} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \phi \right) = -\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad (2.a)$$

$$K G_{rz} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + K G_{rz} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \phi \right) = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.б)$$

$$C_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - C_\theta \frac{u}{r^2} = \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2.в)$$

$$C_k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) = \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (2.г)$$

$$D_k \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\psi}{r^2} \right) - K h G_{\theta z} \psi = -\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}. \quad (2.д)$$

Для определения основных функций, однозначно описывающих динамическое поведение плиты, необходимо вычислить нормальные перемещения точек срединной поверхности $w(t)$. Другие уравнения решаются отдельно друг от друга. Функциональные коэффициенты лучевого ряда для искомой функции определим с помощью подхода, по которому степенные разложения подставляются в виде (1) и затем приравниваются у систем одного порядка [15, 16].

Из функциональных уравнений (2.a), (2.б) до произвольных констант получим систему рекуррентных дифференциальных уравнений, которые решаются отдельно для каждого показателя степени.

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\rho G^2}{B_r} \right) \omega_{\phi(k+1)} &= 2 \frac{\delta \omega_{\phi(k)}}{\delta t} + G r^{-1} \omega_{\phi(k)} + b_r G X_{w(k)} + F_{\phi(k-1)}, \\ \left(1 - \frac{\rho G^2}{K G_{rz}} \right) X_{w(k+1)} &= 2 \frac{\delta X_{w(k)}}{\delta t} + G r^{-1} X_{w(k)} - G \omega_{\phi(k)} + F_{w(k-1)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $X_{w(k)} = [w, (k+1)]$, $\omega_{\phi(k)} = [\phi, (k+1)]$, $b_r = h K G_{rz} D_r^{-1}$, $r = r_0 + Gt$,

$$\begin{aligned} F_{\phi(k-1)} &= -\frac{\delta^2 \omega_{\phi(k-1)}}{\delta t^2} - G r^{-1} \frac{\delta \omega_{\phi(k-1)}}{\delta t} + G^2 r^{-2} \frac{E_\theta}{E_r} \omega_{\phi(k-1)} - b_r G \frac{\delta X_{w(k-1)}}{\delta t} + b_r G^2 \omega_{\phi(k-1)} \leftrightarrow, \\ F_{w(k-1)} &= -\frac{\delta^2 X_{w(k-1)}}{\delta t^2} - G r^{-1} \frac{\delta X_{w(k-1)}}{\delta t} + G \frac{\delta \omega_{\phi(k-1)}}{\delta t} + G^2 r^{-1} \omega_{\phi(k-1)} \leftrightarrow. \end{aligned} \quad (4)$$

Составим решение в виде отрезка ряда с пятью степенями [8, 17].

Подставим в выражения (3), (4) $k = -1, 0, 1, 2, 3$, коэффициенты для фронта продольной волны:

$$\rho G^{(1)2} = B_r, X_{w(0)}^{(1)} = 0, \quad (5)$$

$$\omega_{\phi(0)}^{(1)} = c_0^{(1)} r_1^{-1/2}, X_{w(1)}^{(1)} = -\frac{G^{(1)}}{f_r} c_0^{(1)} r_1^{-1/2}, \quad (6)$$

$$\omega_{\phi(1)}^{(1)} = c_1^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)} c_0^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(1)} r_1^{1/2}, \quad (7)$$

$$X_{w(2)}^{(1)} = -\frac{G^{(1)}}{f_r} \left[c_1^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) G^{(1)} c_0^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(1)} r_1^{1/2} \right], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \omega_{\phi(2)}^{(1)} = & c_2^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)} c_1^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_1^{(1)} r_1^{1/2} + \\ & + \frac{1}{8} G^{(1)2} \frac{b_r^2}{e_r^2} c_0^{(1)} r_1^{3/2} - \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)2} c_0^{(1)} r_1^{-5/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} X_{w(3)}^{(1)} = & -\frac{G^{(1)}}{f_r} \left[c_2^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) G^{(1)} c_1^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_1^{(1)} r_1^{1/2} - \left(\frac{E_0}{E_r} - 1 \right) G^{(1)2} \frac{1}{f_r} c_0^{(1)} r_1^{-5/2} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right)^2 G^{(1)2} c_0^{(1)} r_1^{5/2} - \left(\frac{1}{f_r} - \frac{3}{4} \right) G^{(1)2} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{8} G^{(1)2} \frac{b_r^2}{e_r^2} c_0^{(1)} r_1^{3/2} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \omega_{\phi(3)}^{(1)} = & c_3^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)} c_2^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_2^{(1)} r_1^{1/2} + \frac{1}{8} G^{(1)2} \frac{b_r^2}{e_r^2} c_1^{(1)} r_1^{3/2} - \\ & - \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)2} c_1^{(1)} r_1^{-5/2} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) G^{(1)3} \frac{b_r}{f_r^2} c_0^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{48} G^{(1)3} \frac{b_r^3}{e_r^3} c_0^{(1)} r_1^{5/2} + \\ & + \left\{ \frac{1}{16} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) - \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) f_r \right] - \frac{3}{8} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) \right\} G^{(1)3} \frac{b_r}{f} c_0^{(1)} r_1^{-3/2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{3}{4} - \frac{1}{f_r} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \frac{f_r}{e_r} + \frac{1}{4} \right] G^{(1)3} \frac{b_r^2}{f_r e_r} c_0^{(1)} r_1^{1/2} - \frac{1}{48} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{25}{4} \right) \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(1)3} c_0^{(1)} r_1^{-7/2}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_{w(4)}^{(1)} = & -\frac{G^{(1)}}{f_r} \left[c_3^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) G^{(1)} c_2^{(1)} r_1^{-3/2} - \frac{1}{2} G^{(1)} \frac{b_r}{e_r} c_2^{(1)} r_1^{1/2} + \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) G^{(1)2} \frac{1}{f_r} c_1^{(1)} r_1^{-5/2} + \right. \\ & + \frac{1}{8} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right)^2 G^{(1)2} c_1^{(1)} r_1^{-5/2} - \left(f_r^{-1} - \frac{3}{4} \right) G^{(4)2} \frac{b_r}{e_r} c_1^{(1)} r_1^{-1/2} + \frac{1}{8} G^{(4)2} \frac{b_r^2}{e_r^2} c_1^{(1)} r_1^{3/2} + \\ & + \frac{1}{120} \left(\frac{11}{4} + \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) G^{(4)3} c_0^{(1)} r_1^{-7/2} - \left[\left(\frac{E_0}{E_r} - 1 \right) \frac{4}{f_r} - \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right)^2 - \frac{9}{8} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) \right] \frac{G^{(1)3}}{f_r} c_0^{(1)} r_1^{-7/2} - \\ & - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{E_0}{E_r} - 1 \right) \frac{1}{f_r} + \frac{1}{8} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{1}{4} \right) \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \frac{1}{f_r} - \left(\frac{9}{4} - \frac{E_0}{E_r} \right) \right] - \frac{3}{4} \left(\frac{E_0}{E_r} - \frac{5}{4} \right) \frac{1}{f_r} + \frac{1}{4} \frac{1}{e_r} \right] b_r G^{(1)3} c_0^{(1)} r_1^{-3/2} + \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{3}{2} - \frac{1}{f_r} \right) + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \left(\frac{11}{4} + \frac{E_0}{E_r} \right) \frac{f_r}{e_r} \right] \frac{b_r^2}{f_r e_r} G^{(1)3} c_0^{(1)} r_1^{1/2} - \frac{1}{48} \frac{b_r^3}{e_r^3} G^{(1)3} c_0^{(1)} r_1^{5/2} \Big], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{где } f_r = 1 - \frac{B_r}{KG_{rz}} = 1 - \frac{G^{(1)2}}{G^{(2)2}} < 0, \quad \frac{1}{e_r} = 1 - \frac{1}{f_r}, \quad e_r = 1 - \frac{KG_{rz}}{B_r} = 1 - \frac{G^{(2)2}}{G^{(1)2}} > 0.$$

На фоне сдвиговой волны получим

$$\rho G^{(2)2} = KG_{rz}, \omega_{\phi(0)}^{(2)} = 0, \quad (13)$$

$$X_{w(0)}^{(2)} = c_0^{(2)} r_2^{-1/2}, \quad \omega_{\phi(1)}^{(2)} = G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(2)} r_2^{-1/2}, \quad (14)$$

$$X_{w(1)}^{(2)} = c_1^{(2)} r_2^{-1/2} - \frac{1}{8} G^{(2)} c_0^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(2)} r_2^{1/2}, \quad (15)$$

$$\omega_{\phi(2)}^{(2)} = G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} \left[c_1^{(2)} r_2^{-1/2} + \frac{3}{8} G^{(2)} c_0^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} c_0^{(2)} r_2^{1/2} \right], \quad (16)$$

$$X_{w(2)}^{(2)} = c_2^{(2)} r_2^{-1/2} - \frac{1}{8} G^{(2)} c_1^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} \frac{b_r}{e_r} G^{(2)} c_1^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{8} \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)2} c_0^{(2)} r_2^{3/2} + \frac{9}{128} G^{(2)2} c_0^{(2)} r_2^{-5/2}, \quad (17)$$

$$\omega_{\phi(3)}^{(2)} = G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} \left\{ c_2^{(2)} r_2^{-1/2} + \frac{3}{8} G^{(2)} c_1^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} G^{(3)} \frac{b_r}{e_r} c_1^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{8} \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)2} c_0^{(2)} r_2^{3/2} - \right. \\ \left. - \left[\frac{1}{e_r} \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) + \frac{15}{128} \right] G^{(2)2} c_0^{(2)} r_2^{-5/2} + \left(\frac{1}{e_r} + \frac{3}{4} \right) \frac{b_r}{e_r} G^{(2)2} c_0^{(2)} r_2^{-1/2} \right\}, \quad (18)$$

$$X_{w(3)}^{(2)} = c_3^{(2)} r_2^{-1/2} - \frac{1}{8} G^{(2)} c_2^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} \frac{b_r}{e_r} G^{(2)} c_2^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{8} \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)2} c_1^{(2)} r_2^{3/2} + \frac{9}{128} G^{(2)2} c_1^{(2)} r_2^{-5/2} + \\ + \frac{1}{2} \frac{b_r}{e_r} \left[\frac{1}{e_r} \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) - \frac{9}{128} \right] G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} \frac{b_r^2}{e_r^2} \left(\frac{1}{e_r} + \frac{9}{32} \right) G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{48} \frac{b_r^3}{e_r^3} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{5/2} - \frac{75}{1024} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{-7/2}, \quad (19)$$

$$\omega_{\phi(4)}^{(2)} = G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} \left\{ c_3^{(2)} r_2^{-1/2} + \frac{3}{8} G^{(3)} c_2^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} G^{(2)} \frac{b_r}{e_r} c_2^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{8} \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)2} c_1^{(2)} r_2^{3/2} - \right. \\ \left[\frac{1}{e_r} \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) + \frac{15}{128} \right] G^{(2)2} c_1^{(2)} r_2^{-5/2} + \left(\frac{1}{e_r} + \frac{3}{4} \right) \frac{b_r}{e_r} G^{(2)2} c_1^{(2)} r_2^{-1/2} + \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{3}{8} - \frac{4}{e_r} \right) \frac{1}{e_r} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{-7/2} \times \\ \times \frac{105}{1024} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{-7/2} + \frac{3}{8} \left(\frac{1}{e_r} + \frac{29}{32} \right) \frac{b_r}{e_r} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{-3/2} + \left(\frac{1}{e_r} + \frac{29}{64} \right) \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{b_r^3}{48 e_r^3} G^{(2)3} c_0^{(2)} r_2^{5/2} \left. \right\}, \quad (20)$$

$$X_{w(4)}^{(2)} = c_4^{(2)} r_2^{-1/2} - \frac{1}{8} G^{(2)} c_3^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} \frac{b_r}{e_r} G^{(2)} c_3^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{8} \frac{b_r^2}{e_r^2} G^{(2)2} c_2^{(2)} r_2^{3/2} + \frac{9}{128} G^{(2)2} c_2^{(2)} r_2^{-5/2} + \\ + \frac{1}{2} \frac{b_r}{e_r} \left[\frac{1}{e_r} \left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) - \frac{9}{128} \right] G^{(2)3} c_1^{(2)} r_2^{-3/2} + \frac{1}{2} \frac{b_r^2}{e_r^2} \left(\frac{1}{e_r} + \frac{9}{32} \right) G^{(2)3} c_1^{(2)} r_2^{1/2} + \frac{1}{48} \frac{b_r^3}{e_r^3} G^{(2)3} c_1^{(2)} r_2^{5/2} - \\ - \frac{75}{1024} G^{(2)3} c_1^{(2)} r_2^{-7/2} - \frac{1}{4} \left[\left(1 - \frac{E_0}{E_r} \right) \left(\frac{4}{e_r} - \frac{3}{4} \right) \frac{1}{e_r} - \frac{117}{1024} \right] \frac{b_r}{e_r} G^{(2)4} c_0^{(2)} r_2^{-5/2} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{e_r} + \frac{25}{24} \right) \frac{b_r^3}{e_r^3} G^{(2)4} c_0^{(2)} r_2^{3/2} + \\ + \frac{1}{384} \frac{b_r^4}{e_r^4} G^{(2)4} c_0^{(2)} r_2^{7/2} + \frac{3675}{16 \cdot 384} G^{(2)4} c_0^{(2)} r_2^{-9/2}. \quad (21)$$

Найденные скачки позволяют записать выражения для искоемых функций W и Q_r в виде отрезков лучевых рядов (22), (24) при замене модуля μ на G_{rz} и скачков $\omega_{(i)}^{(\alpha)}$, $X_{(i)}^{(\alpha)}$ на $\omega_{\phi(i)}^{(\alpha)}$, $X_{w(i)}^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1, 2$) ($i = 0, 1, \dots, 4$) соответственно [18]. Таким образом определяются искоемые функции с точностью до произвольных постоянных $c_i^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1, 2$) ($i = 0, 1, \dots, 4$), которые находятся из граничных условий [19, 20].

$$W \cong \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k!} X_{(k)}^{(\alpha)} (y_a)^k H(y_a), \quad (22)$$

$$Q_r \cong K \mu h \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k!} \left(-X_{(k)}^{(\alpha)} G^{(\alpha-1)} + \frac{\delta X_{(k-1)}^{(\alpha)}}{\delta t} G^{(\alpha-1)} - \omega_{(k-1)}^{(\alpha)} \right) (y_a)^k H(y_a), \quad (23)$$

где $y_a = t - (r - r_0) G^{(\alpha-1)}$, величины $X_{(k)}^{(\alpha)}$, $\omega_{(k-1)}^{(\alpha)}$ и их δ -производные подсчитываются при $y_a = 0$.

В представленной постановке задачи учитывается, что основная нагрузка на плиту передается с помощью одиночных ударных воздействий.

Система определяющих уравнений примет вид для описания движения колеса пары после его касания рельса посредством буфера:

$$P = E_1 (\alpha - w). \quad (24)$$

Уравнение движения контактной области плитной конструкции имеет следующий вид:

$$ph\pi r_0^2 \dot{W} = 2\pi r_0 Q_r + P(t). \quad (25)$$

Возвращаясь к начальным условиям динамического поведения колесной пары и фрагмента железобетонной плиты, приведенных в уравнениях (1), подставим величину y в уравнения (26) и (27), система примет вид (26):

$$\dot{W} + bW = V_0. \quad (26)$$

$$\text{При условии } \dot{\alpha} = \begin{cases} = V_0, \\ t = 0 \end{cases}$$

Для решения системы уравнений (1) нужно представить функции $w(t)$, $W(t)$, $\ddot{w}(t)$, $Q(t)$, входящие в нее, в виде степенных рядов по времени t . С этой целью необходимо записать лучевые ряды (22), (23) для изотропной упругой плиты (в общем случае данная модель соответствует стандартному армированию (рис. 3) [23] на границе области контакта, т.е. при $r = r_0$):

$$W = X_{(0)}^{(2)} + \left(X_{(1)}^{(1)} + X_{(1)}^{(2)}\right)t + \frac{1}{2}\left(X_{(2)}^{(1)} + X_{(2)}^{(2)}\right)t^2 + \frac{1}{6}\left(X_{(3)}^{(1)} + X_{(3)}^{(2)}\right)t^3 + \frac{1}{24}\left(X_{(4)}^{(1)} + X_{(4)}^{(2)}\right)t^4. \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Q_r = K\mu h \left[\left(-\frac{X_{(0)}^{(2)}}{G^{(2)}} \right) + \left(-\frac{X_{(1)}^{(1)}}{G^{(1)}} - \omega_{(0)}^{(1)} - \frac{X_{(1)}^{(2)}}{G^{(2)}} + \frac{\delta X_{(0)}^{(2)}}{\delta t} \frac{1}{G^{(2)}} \right) t + \right. \\ \left. + \frac{1}{6} \left(-\frac{X_{(3)}^{(1)}}{G^{(1)}} + \frac{\delta X_{(2)}^{(1)}}{\delta t} \frac{1}{G^{(1)}} - \omega_{(2)}^{(1)} - \frac{X_{(3)}^{(2)}}{G^{(2)}} + \frac{\delta X_{(2)}^{(2)}}{\delta t} \frac{1}{G^{(2)}} - \omega_{(2)}^{(2)} \right) t^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{24} \left(-\frac{X_{(4)}^{(1)}}{G^{(1)}} + \frac{\delta X_{(3)}^{(1)}}{\delta t} \frac{1}{G^{(1)}} - \omega_{(3)}^{(1)} - \frac{X_{(4)}^{(2)}}{G^{(2)}} + \frac{\delta X_{(3)}^{(2)}}{\delta t} \frac{1}{G^{(2)}} - \omega_{(3)}^{(2)} \right) t^4 \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial r} = \frac{\partial X_{(0)}^{(2)}}{\partial r} - \frac{X_{(1)}^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{X_{(1)}^{(2)}}{G^{(2)}} + \left(\frac{\partial X_{(1)}^{(1)}}{\partial r} + \frac{\partial X_{(1)}^{(2)}}{\partial r} - \frac{X_{(2)}^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{X_{(2)}^{(2)}}{G^{(2)}} \right) t + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial X_{(2)}^{(1)}}{\partial r} + \frac{\partial X_{(2)}^{(2)}}{\partial r} - \frac{X_{(3)}^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{X_{(3)}^{(2)}}{G^{(2)}} \right) t^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial X_{(3)}^{(1)}}{\partial r} + \frac{\partial X_{(3)}^{(2)}}{\partial r} - \frac{X_{(4)}^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{X_{(4)}^{(2)}}{G^{(2)}} \right) t^3 = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

С этим соотносится отрезок степенного ряда для функции деформации буфера α :

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5, \quad (30)$$

где α_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) — пока неизвестные константы.

В начальный момент времени модельная пружина не деформирована, т.е. $\alpha_0 = 0$ (считается, что железнодорожный путь находится в проектном положении).

Подставляя выражения (22)–(30) в уравнение (1) и приравнявая коэффициенты в полученных выражениях при одинаковых степенях t , получим на каждом шаге три алгебраических уравнения для определения трех неизвестных констант: $c_i^{(1)}$, $c_i^{(2)}$ ($i = 0, 1, 2, 3$) и α_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$).

В случае изотропной вязкоупругой пластинки вместо лучевого разложения (23) для перерезывающей силы необходимо использовать отрезок степенного ряда вида (31).

$$\begin{aligned} Q_r \cong K\mu h \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k!} \left[\left(-X_{(k)}^{(\alpha)} G^{(\alpha)-1} + \frac{dX_{(k-1)}^{(\alpha)}}{dt} G^{(\alpha)-1} - \omega_{(k-1)}^{(\alpha)} \right) + \left(-X_{(k-1)}^{(\alpha)} G^{(\alpha)-1} + \frac{dX_{(k-2)}^{(\alpha)}}{dt} G^{(\alpha)-1} - \omega_{(k-2)}^{(\alpha)} \right) \right] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Gamma(0) + \sum_{i=0}^{i=k-2} \left(-X_{(i)}^{(\alpha)} G^{(\alpha)-1} + \frac{dX_{(i-1)}^{(\alpha)}}{dt} G^{(\alpha)-1} - \omega_{(i-1)}^{(\alpha)} \right) \Gamma(0)_{(k-i-1)} \left] y_{\alpha}^k H(y_{\alpha}). \end{aligned} \quad (31)$$

На рис. 4 приведены графические зависимости максимальной контактной силы $\tilde{P}$ от вертикальной составляющей скорости динамического контакта колеса и рельса $\tilde{V}$ (примерно соответствует скорости движения экипажа от 0 до 200 км/ч) при следующих параметрах безбалластной конструкции пути: нагрузка на ось — 20 т; толщина железобетонной плиты — 20 см; жесткость контакта рельса и полушпалы принималась соответствующая подкладке скрепления АРС-4, остальные характеристики принимались стандартными для российских железных дорог. Кривая 1 на рис. 4 построена при значениях приведенной безразмерной

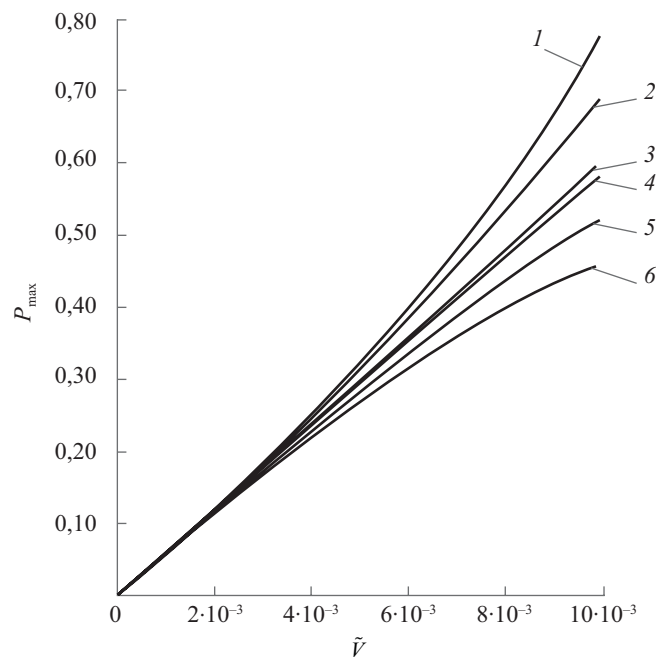


Рис. 4. Зависимость безразмерной максимальной силы взаимодействия колеса и рельса от вертикальной составляющей скорости динамического контакта колеса и рельса $\tilde{V}$ для различных значений приведенной безразмерной характеристики жесткости железнодорожного пути $\tilde{E}$

Fig. 4. Dependence of the dimensionless maximum interaction force between the wheel and the rail on the vertical component of the dynamic contact speed of the wheel and the rail $\tilde{V}$ for various values of the given dimensionless rail rigidity characteristic $\tilde{E}$

характеристики жесткости железнодорожного пути $\tilde{E} = 90 \cdot 10^{-6}$, кривая 2 — $\tilde{E} = 40 \cdot 10^{-6}$, кривая 3 — $\tilde{E} = 10 \cdot 10^{-6}$, кривая 4 — $\tilde{E} = 1 \cdot 10^{-6}$, кривая 5 — $\tilde{E} = 0,05 \cdot 10^{-6}$, кривая 6 — $\tilde{E} = 0,02 \cdot 10^{-6}$. Представленные величины приведенной безразмерной характеристики жесткости железнодорожного пути примерно соответствуют изменениям жесткости верхнего строения пути при использовании конструкций пути от безбалластного типа (кривые 1, 2) до традиционных конструкций на балластной призме с различной степенью подбивки щебня (кривые 3–6).

Можно заметить, что при увеличении $\tilde{E}$ максимумы силы взаимодействия колеса и рельса увеличиваются, а при уменьшении $\tilde{E}$ уменьшаются по сравнению с некоторой прямолинейной зависимостью, соответствующей железнодорожному пути на балласте, поддерживаемом в нормативном состоянии. При увеличении абсолютного значения $\tilde{E}$ на зависимость силы взаимодействия от вертикальной компоненты скорости экипажа $\tilde{V}$ все большее влияние оказывают нелинейные свойства конструкции железнодорожного пути.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя полученные аналитические и графические зависимости динамических и кинематических параметров поведения конструкции железнодорожного пути, можно сделать ряд качественных выводов:

1. Нелинейные параметры жесткости конструкции пути начинают оказывать существенное влияние на силу взаимодействия колеса и рельса в середине процесса динамического контакта, а также при увеличении скоростей экипажей.

2. Параметры жесткости железнодорожного пути могут как увеличивать максимальную силу взаимодействия колеса и рельса, делая ее графическую зависимость жесткой (вторая производная положительна), так и уменьшать ее при мягкой характеристике нелинейности (вторая производная отрицательна) по сравнению со значением для нормативного состояния железнодорожного пути традиционной балластной конструкции.

3. Предложенная математическая модель отдельного элемента плиты основания позволяет учесть волновые процессы в нем от действия динамической нагрузки от подвижного состава. Влияние распространения упругих волн на напряженно-деформированное состояние железнодорожного пути, как системы, становится заметным при скоростном движении транспортных средств и может быть определяющим для высокоскоростного движения экипажей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование характеризуется не только полученными аналитическими и графическими результатами, но и предложенной моделью плиты основания железнодорожного пути,

использование которой совместно с описанными вычислительными алгоритмами и процедурами может существенно упростить труд инженеров-проектировщиков и конструкторов, разрабатывающих

проекты и выполняющих научно-техническое сопровождение строительства высокоскоростных магистралей и железных дорог для скоростного пассажирского движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.В., Сычев В.П. Основные направления развития транспортных систем // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 10. № 10 (10). С. 129.
2. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters // Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics. 2017. P. 291–307.
3. Киселев Ф.Б., Мансуров А.Р., Рамазанов М.И. Моделирование динамического воздействия подвижного состава на основание железнодорожной насыпи с цилиндрической полостью // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 10. № 10 (10). С. 37–45.
4. Коган А.Я., Суслов О.А., Полещук И.В. Устойчивость бесстыкового пути по условию сдвига рельсошпальной решетки под проходящими поездами с учетом трения // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 2. С. 22–26.
5. Абдурашитов А.Ю., Сычев В.П., Абдурашитов Ю.А. Выбор моделей напряженно-деформированного состояния железнодорожных рельсов при различных вариантах их закаливании // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 10. № 10 (10). С. 64–79.
6. Коган А.Я., Полещук И.В. Оценка вибрации пути при высоких скоростях движения // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 4 (53). С. 6–15.
7. Savin A.V., Korolev V.V., Shishkina I.V. Determining service life of non-ballast track based on calculation and test // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. P. 022035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022035
8. Сычева А.В., Сычев В.П., Бучкин В.А., Быков Ю.А. Моделирование работы железнодорожного пути как системы квазиупругих ортотропных слоев // Вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 37–46.
9. Savin A.V. The Service Life of Ballastless Track // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp. 379–385. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060
10. Коган А.Я., Савин А.В., Полещук И.В. Разработка системы контроля безопасной эксплуатации бесстыкового пути по условию его устойчивости // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2010. Т. 3. № 3 (3). С. 1–5.
11. Колос А.Ф., Петрова Т.М., Сидоренко А.А. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали // Техника железных дорог. 2013. № 2 (22). С. 42–47.
12. Савин А.В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 2. С. 2–8.
13. Georgios M. Slab track systems for high-speed railways. Master Degree Project, Stockholm, 2012. 95 p.
14. Savin A., Korolev V., Loktev A., Shishkina I. Vertical Sediment of a Ballastless Track // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Pp. 797–808. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_78
15. Савин А.В., Королев В.В., Шишкина И.В. Расчет на прочность безбалластного пути: учебное пособие. М. : МИИТ, 2018. С. 38–48.
16. Савин А.В. Безбалластный путь. М. : РАС, 2017. 189 с.
17. Савин А.В., Разуваев А.Д. Сферы применения безбалластного пути // Техника железных дорог. 2016. № 3 (35). С. 32–41.
18. Goremikins V., Serdjus D., Buka-Vaivade K., Pakrastins L., Vatin N. Prediction of behaviour of prestressed suspension bridge with timber deck panels // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2017. Vol. 12. Issue 4. Pp. 239–240. DOI: 10.3846/bjrbe.2017.29
19. Савин А.В. Экспериментальное кольцо: укладка новых конструкций пути // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 2. С. 12–15.
20. Shishkina I. Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Pp. 834–844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82

Поступила в редакцию 12 мая 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 июля 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Лилия Алексеевна Илларионова** — старший преподаватель кафедры зданий и сооружений на транспорте; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))**; 125190, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2; SPIN-код: 3706-4022; illarionova.roat@mail.ru;

Алексей Алексеевич Локтев — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))**; 125190, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2; SPIN-код: 5766-6018; Scopus: 35618959900; ResearcherID: W-1762-2017; ORCID: 0000-0002-8375-9914; aaloktev@yandex.ru.

REFERENCES

1. Potapov A.V., Sychev V.P. The main directions of the development of transport systems. *Introduction of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities*. 2016; 10(10):(10):129. (rus.).
2. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters. *Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. Vol.1. Theoretical and Applied Mathematics*. 2017; 291-307.
3. Kiselev F.B., Mansurov A.R., Ramazanov M.I. Modeling of dynamic impact of rolling stock on the base of a railway embankment with a cylindrical cavity. *Introduction of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities*. 2016; 10(10):(10):37-45. (rus.).
4. Kogan A. Ya., Suslov O.A., Poleschuk I.V. Jointless track stability in the terms of rail-sleeper grid shift under passing trains with account of friction. *Vestnik of the Railway Research Institute*. 2012; 2:22-26. (rus.).
5. Abdurashitov A.Yu., Sychev V.P., Abdurashitov Yu.A. Selection of models of the stress-strain state of railway rails in various variants of their hardening. *Introduction of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities*. 2016; 10(10):(10):64-79. (rus.).
6. Kogan A.Ya., Poleschuk I.V. Evaluation of track's vibration at high speed. *World of Transport and Transportation*. 2014; 12(4):(53):6-15. (rus.).
7. Savin A.V., Korolev V.V., Shishkina I.V. Determining service life of non-ballast track based on calculation and test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 687:022035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022035
8. Sycheva A.V., Sychev V.P., Buchkin V.A., Bykov Y.A. Modeling of railway track operation as a system of quasi-elastic orthotropic layers. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 3:37-46. (rus.).
9. Savin A.V. The Service Life of Ballastless Track. *Procedia Engineering*. 2017; 189:379-385. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060
10. Kogan A.Ya., Savin A.V., Poleschuk I.V. Development of a control system for the safe operation of a continuous joint path according to the condition of its stability. *Introduction of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities*. 2010; 3(3):(3):2-5. (rus.).
11. Kolos A.F., Petrova T.M., Sidorenko A.A. Problems of RHEDA 2000 ballast less track superstructure construction exploitation at rail main line. *Railway Engineering*. 2013; 2:42-47. (rus.).
12. Savin A.V. Criteria for choosing a construction of a ballast-free path. *Path and Track Management*. 2014; 2:2-8. (rus.).
13. Georgios M. *Slab track systems for high-speed railways*. Master Degree Project, Stockholm, 2012; 95.
14. Savin A., Korolev V., Loktev A., Shishkina I. Vertical Sediment of a Ballastless Track. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. 2020; 797-808. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_78
15. Savin A.V., Korolev V.V., Shishkina I.V. *Calculation of the strength of ballastless track: tutorial*. Moscow, Russian University of Transport, 2018; 38-48. (rus.).
16. Savin A.V. *Ballastless way*. Moscow, RAS, 2017; 192. (rus.).
17. Savin A.V., Razuvayev A.D. Ballastless track applications. *Railway Engineering*. 2016; 3(35):32-41. (rus.).
18. Goremikins V., Serdjusks D., Buka-Vaivade K., Pakrastins L., Vatin N. Prediction of behaviour of prestressed suspension bridge with timber deck panels. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2017; 12(4):239-240. DOI: 10.3846/bjrbe.2017.29
19. Savin A.V. Experimental ring: laying of new track constructions. *Path and Track Facilities*. 2015; 2:12-15. (rus.).
20. Shishkina I. *Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal*. VIII International Scientific Siberian Transport Forum, 2020; 834-844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82

Received May 12, 2020.

Adopted in a revised form on July 7, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: **Lilia A. Illarionova** — Lecturer of the Department of Buildings and Structures in Transport; **Russian University of Transport (RUT (MIIT))**; 22/2 Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation; SPIN-code: 3706-4022; illarionova.roat@mail.ru;

Alexey A. Loktev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction; **Russian University of Transport (RUT (MIIT))**; 22/2 Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation; SPIN-code: 5766-6018; Scopus: 35618959900; ResearcherID: W-1762-2017; ORCID: 0000-0002-8375-9914; aaloktev@yandex.ru.

Несущая способность листовых фасонкок из пултрузионного стеклопластика в решетчатых конструкциях

Д.Н. Арипов, И.Л. Кузнецов, М.А. Салахутдинов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время развивается проектирование и строительство цельнокомпозитных конструкций с применением пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП). Несущая способность цельнокомпозитных конструкций зачастую ограничивается их узловыми соединениями. В последние два десятилетия многие исследования посвящены работе узловых соединений элементов из полимеров, армированных волокнами (ПАВ), соединяемых под прямым углом (или по направлению и поперек пултрузии). Узловое соединение в решетчатых конструкциях образуется путем примыкания элементов решетки под различными углами к поясам через листовые фасонки. Согласно анализу литературы, для исследования соединений под углом к направлению пултрузии проведено незначительное количество испытаний. Существующие конструктивные решения листовых фасонкок в решетчатых конструкциях из ПСП в основном выполняются стальными либо из композита, получаемого по другой технологии (метод прессования, пропитки под давлением). Данное исследование сфокусировано на реализации узлового соединения на листовых фасонках из однонаправленного материала, где волокна расположены под углом 0° . Учитывая особенности материала, конструирование листовой фасонки в решетчатой конструкции адаптировано под свойства пултрузионного стеклопластика. Цель работы — повышение эффективности использования листовых фасонкок из ПСП в решетчатых конструкциях на основе учета характеристик данного материала.

Материалы и методы. При конструировании узлового соединения на листовых фасонках решетчатой конструкции применялся метод адаптации. Материал трапециевидной стальной фермы меняется на композит с сохранением исходного конструктивного решения. В последующем выполняется модернизация конструкции, направленная на учет свойств и особенностей композитного материала.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в выявлении запаса прочности пултрузионных стеклопластиков при различных углах к направлению усилия. Для повышения несущей способности узлового соединения элементов предлагаются различные конструктивные решения фасонкок, которые учитывают различные усилия в элементах решетчатой конструкции.

Выводы. При проектировании конструкций из ПСП необходимо учитывать особенности материала. Замена традиционных материалов на композит без изменения конструктивной схемы и модернизации конструкции приводит к повышенной материалоемкости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: решетчатая конструкция, листовая фасонка, пултрузия, стеклопластик, несущая способность, болтовое соединение, смятие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Арипов Д.Н., Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А. Несущая способность листовых фасонкок из пултрузионного стеклопластика в решетчатых конструкциях // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1115–1125. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1115-1125

Bearing capacity of pultrusion fiberglass gusset sheets in frame structures

Daler N. Aripov, Ivan L. Kuznetsov, Marat A. Salakhutdinov

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At present, design and construction of all-composite structures with the use of pultrusion fiberglass profiles (PFP) are developing. The bearing capacity of all-composite structures is often limited by their node connections. Over the last two decades, many studies have been devoted to the operation of fiber-reinforced polymer (FRP) element nodes connected at right angles (or in the direction of pultrusion and across it). Frame construction nodes are formed by adjoining frame elements at different angles to the bands through gusset sheets. In accordance with the literature analysis, a small number of tests have been carried out to investigate connections at angles to the pultrusion direction. Existing design solutions of gusset sheets in FRP frame structures are mainly made of steel or composite material produced using other technologies (compaction method, pressure treatment method). This study focuses on the implementation of a node connection on unidirectional gusset sheets in which the fibers are positioned at the angle of 0° . Taking into account the specific features of the material, the gusset sheet design in frame structures has been adapted to the properties of pultrusion fiberglass. The purpose of this study is to increase the efficiency of PFP gusset sheet use in frame structures based on the specifications of this material.

Materials and methods. The adaptive method was used when designing the node connection design on the frame structure gusset sheets. The material of the trapezoidal steel truss is changed to the composite material while retaining the original design solution. Subsequently, the structure is upgraded to take into account the properties and features of the composite material.

Results. The main results of the study involve determining the factor of safety of pultrusion fiberglass at different angles to the direction of force. In order to increase the bearing capacity of the element node connection, various gusset plate design solutions are provided, which take into account different forces in the frame structure elements.

Conclusions. When designing PFP constructions, features of the material must be taken into account. Replacing traditional materials with composite without adjusting the design layout and upgrading the structure leads to increased material intensity.

KEYWORDS: frame structure, gusset sheet, pultrusion, fiberglass, bearing capacity, bolted connection, bearing

FOR CITATION: Aripov D.N., Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A. Bearing capacity of pultrusion fiberglass gusset sheets in frame structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1115-1125. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1115-1125 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Полимеры, армированные волокнами (ПАВ), являются прогрессивными материалами, которые имеют несколько преимуществ по сравнению с традиционными материалами [1]. ПАВ постепенно применяют в гражданском строительстве благодаря высокому соотношению прочности к весу, коррозионностойкости, адаптивности к различным условиям [2].

Сегодня развивается проектирование и строительство цельнокомпозитных конструкций с применением пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) строительного назначения [3]. Благодаря механическим характеристикам ПСП служит альтернативой стали и древесине [4]. Широкое применение ПСП нашли в пешеходных и автомобильных мостах [5], временных каркасных сооружениях [6], независимых легких конструкциях в существующих зданиях [7]. ПСП можно использовать для увеличения жесткости на изгиб существующих перекрытий или покрытий с малым увеличением веса, или для строительства конструкций без чрезмерной перегрузки [8].

Последние два десятилетия многие исследования были посвящены узловым соединениям элементов из ПСП [9]. Узловые соединения элементов из ПСП выполняются болтовыми, клеевыми и клеомеханическими [10]. Цельнокомпозитная конструкция из ПСП ограничена узловыми соединениями, которые представляют собой конструктивные разрывы, связанные с локализацией напряжений. Несущая способность узлового соединения элементов из ПСП подвержена влиянию таких факторов, как высокая концентрация напряжений вблизи отверстий под болты, отсутствие площадки текучести, снижение прочности из-за характерных отказов, смятие, растяжение по сечению нетто, сдвиг, скалывание.

Экспериментальные исследования болтовых соединений элементов из ПСП выполнены Мотттрамом и Жэнг [11], и Турвей и Купер [12]. Экспериментальные исследования показывают, что начальная жесткость узлового соединения определяется соединительными элементами, которые выполняются из пултрузионных стеклопластиковых уголков, а не стальными болтами. Несущая способность стальных болтов в узловых соединениях элементов

из ПСП выше, чем соединяемые элементы. Полное разрушение соединительных элементов на болтах характеризуется хрупким разрушением материала, форма которого зависит как от прочности каждого элемента, так и от конфигурации соединения. Но в работах [11, 12] рассматривались соединения в основном под прямым углом (балки с колонной), где усилия в элементах совпадают или не совпадают с направлением пултрузии. Как правило, присоединение балки к колонне выполняется при помощи верхних и нижних накладок или уголками [13].

Реализацию решетчатой конструкции, где элементы решетки примыкают к поясам под различными углами, выполняют через листовые фасонки. Данное решение отличается от традиционных решений тем, что напряжения и деформации передаются не через накладки, а через листовые фасонки. Согласно существующим нормам проектирования для упрощения процесса конструирования фасонки, накладки и уголки, соединяющие элементы, должны быть изготовлены из пластинчатого металла. Допускается заменять металлические элементы элементами из ПСП после предварительных экспериментов, подтверждающих возможность выполнения предусмотренных функций принятым узловым решением в течение всего периода эксплуатации конструкции. Изучение реальной работы узлового соединения на листовых фасонках из ПСП в решетчатой конструкции играет важную роль и нуждается в исследовании [14].

Реализацию узлового соединения на листовых фасонках в решетчатой конструкции с применением ПАВ можно встретить в отечественном мостостроении. В 2004 г. по заказу ОАО «РЖД» был построен первый мост с цельнокомпозитными пролетными строениями по схеме 13,2 + 15,0 + 13,2 м полной длиной 41 м (рис. 1). К достоинствам пролетных строений можно отнести их малый вес, интенсивность которого на один погонный метр составляет 285 кгс, и стойкость к воздействию агрессивных сред. Все соединения элементов ферм выполнены на болтах с использованием металлических фасонки (рис. 2).

Зарубежный опыт проектирования цельнокомпозитных конструкций можно встретить в работах [15–17]. При реконструкции церкви Санта Мария Паганика в ЛАквила была возведена цельнокомпозитная решетчатая конструкция (рис. 3). Узловое



Рис. 1. Пешеходный мост около остановочного пункта Чертаново

Fig. 1. Pedestrian bridge near the Chertanovo stop



Рис. 2. Узловые соединения решетчатых пролетных строений, выполненные Научно-производственным предприятием «АпАТэК»

Fig. 2. Node connections of ApATeK Research and Development Enterprise bridge superstructure



Рис. 3. Целлюлознокомпозитная стеклопластиковая решетчатая конструкция

Fig. 3. All-composite fiberglass frame structure

соединение образуется путем примыкания под различными углами элементов решетки на листовую стеклопластиковую фасонку (рис. 4). Решетчатая конструкция изготовлена из стеклопластиковых швеллеров, соединенных стальными болтами.

Листовая фасонка из стеклопластика выполнена методом вакуумной инфузии, армирующее стекловолокно укладывается в форму, в которой с помощью

специальной пленки создается вакуум. В вакуумной форме, благодаря разнице в давлении, происходит более глубокая и полная по сравнению с остальными способами пропитка стекловолокна эпоксидной смолой. После окончательной полимеризации получается изделие повышенной прочности.

Анализ конструкций показывает, что все они наряду с достоинствами не лишены недостатков,

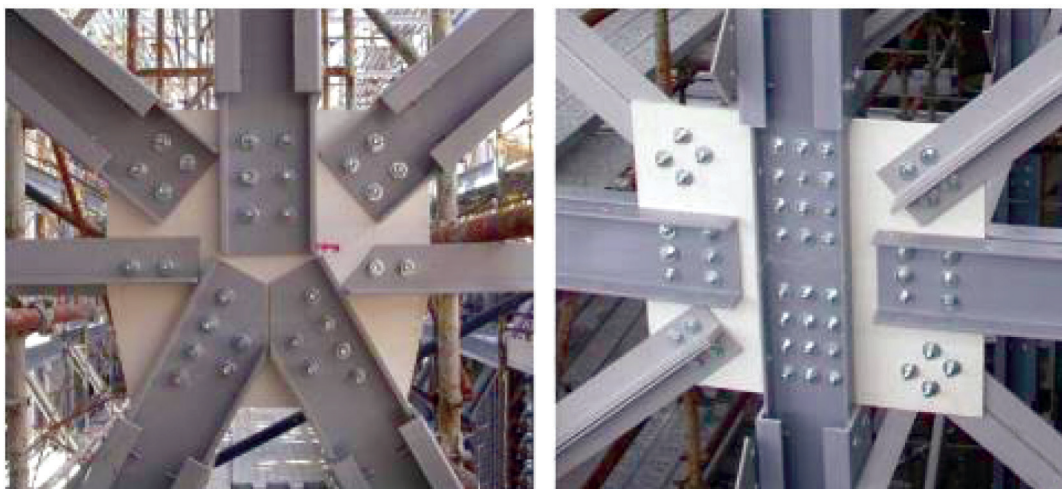


Рис. 4. Элементы узлового соединения цельнокомпозитной конструкции

Fig. 4. All-composite structure node connection elements

которые в конечном счете и определяют эффективность использования нового материала. Поиск конструктивных решений ведется постоянно с учетом особенностей конкретных применяемых материалов. Эти материалы обладают большим потенциалом и могут использоваться в различных отраслях промышленности.

Настоящая работа сфокусирована на реализации узлового соединения на листовых фасонках из однонаправленного материала, где волокна расположены под углом 0° . Учитывая особенности материала, конструирование листовой фасонки в решетчатой конструкции адаптировано под свойства пултрузионного стеклопластика.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данной статьи для исследования листовых фасонки из ПСП предложена трапецевидная ферма с габаритами и параметрами, приведенными на рис. 5.

В ходе изучения трапецевидной фермы выполнены компьютерное моделирование, расчеты и конструирование элементов с учетом реальных физико-механических характеристик композитного материала. Статический расчет трапецевидной фермы из ПСП производился с учетом нагрузок от собственного веса и снеговых нагрузок (рис. 5). При конструировании трапецевидной фермы был

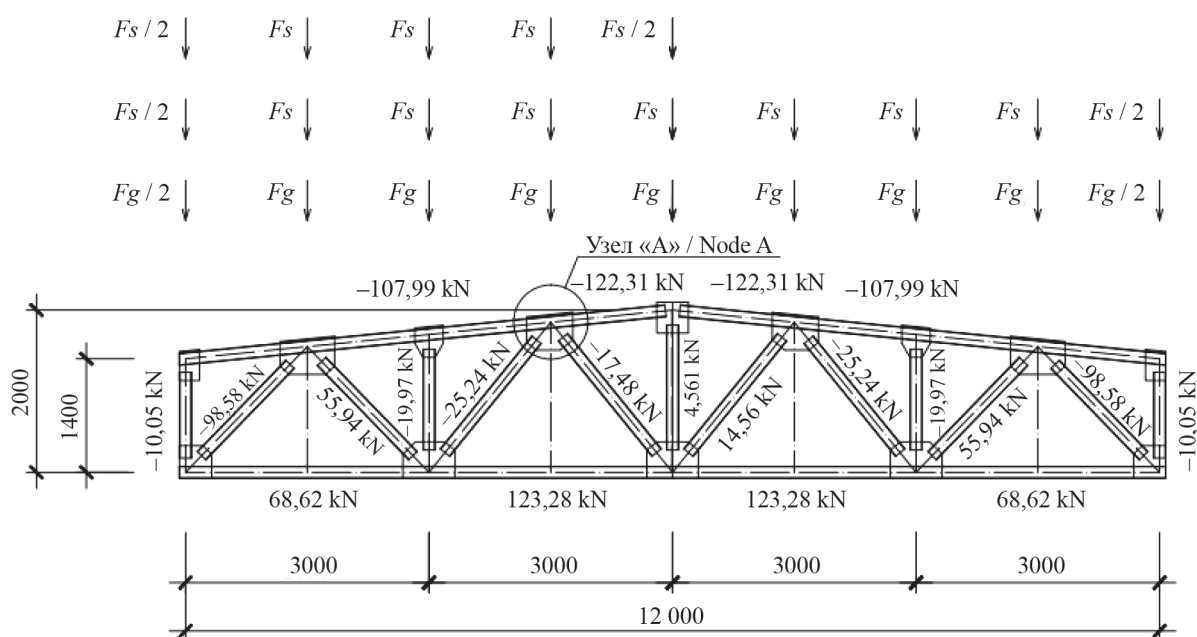


Рис. 5. Трапецевидная ферма с усилиями в элементах

Fig. 5. Trapezoidal truss with forces at the elements

использован швеллер производства ООО «Татнефть-Прессккомпозит» (г. Елабуга).

Несущая способность соединения должна превышать усилие, действующее в узле:

$$S \leq S_{\text{нес}},$$

где S — усилие, действующее в узле; $S_{\text{нес}}$ — несущая способность соединения.

$$S_{\text{нес}} = \min\{nS_{bp}; S_{mt}; S_{LT}; S_{cl}\},$$

где S_{bp} — несущая способность материала профилей на смятие; S_{mt} — несущая способность материала профилей на растяжение; S_{LT} — несущая способность материала профилей на срез; S_{cl} — несущая способность материала профилей на скалывание.

При проектировании болтовых соединений элементов из ПСП важным является то, что существует несколько вариантов разрушения болтовых соединений элементов из ПСП. На рис. 6 позиции a – f показывают основные варианты разрушения одноболтовых соединений и позиции g и h — для многоболтовых соединений.

При конструировании болтовых соединений смятие — единственный вариант отказа, не приводящий к хрупкому разрушению. Однако не всегда смятие будет определяющим критерием для соединений. В работах [18, 19] материал был подвержен воздействию воды или повышенной температуры. Тип разрушения болтовых соединений изменял-

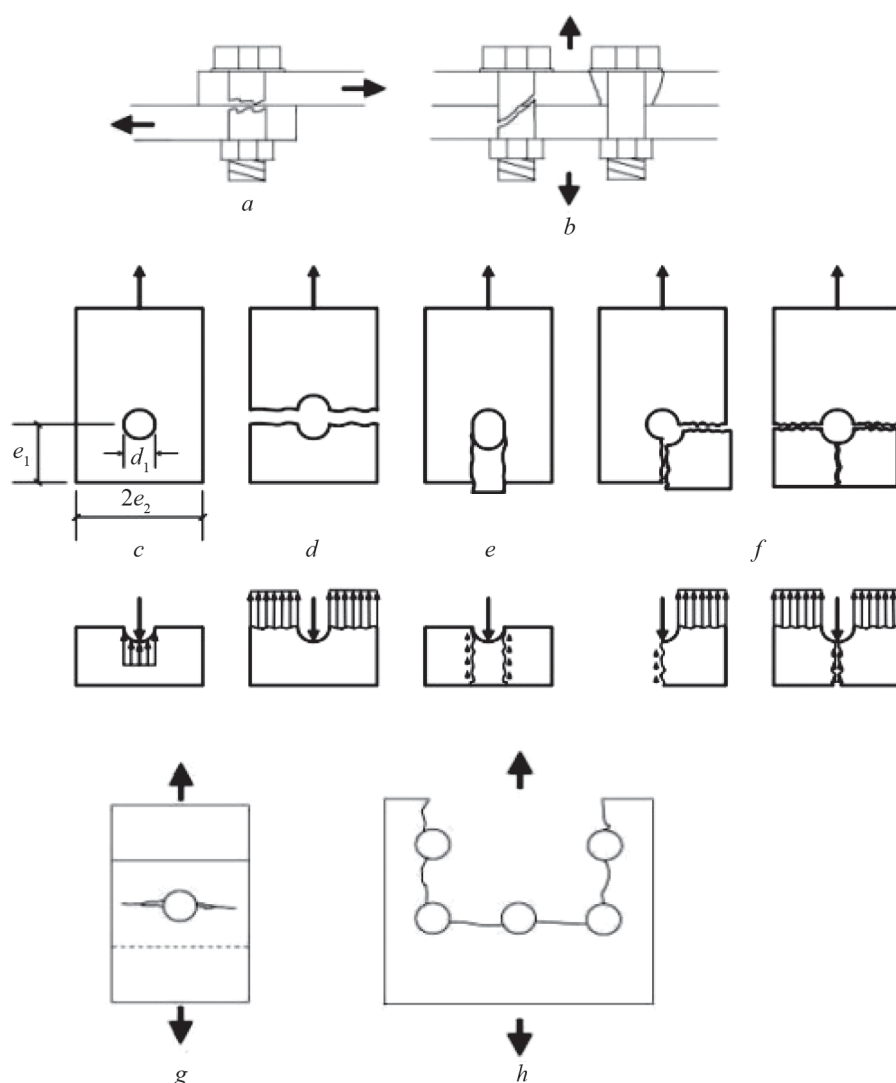


Рис. 6. Различные виды отказа болтовых соединений и распределение напряжений в них: a — срез болта; b — вырыв; c — смятие; d — растяжение по сечению нетто; e — сдвиг; f — скалывание; g — растяжение по сечению нетто «раскалывание», когда незагруженная кромка не рядом; h — группа соединений

Fig. 6. Various types of bolt connection failures and strain distribution: a — bolt shearing; b — tear-out; c — bearing; d — tension over the net section; e — shifting; f — chipping; g — tension over the splitting net section while the unloaded lip is not nearby; h — connection group

ся от вырыва, скалывания или разрыва до смятия. Это связано с более быстрым снижением несущей способности на смятие при старении от воздействия эксплуатационных факторов, чем прочность материала, которая определяет разрыв, вырыв или скалывание. Когда направление пултрузии составляет 90° по отношению к усилию, определяющий тип разрушения — разрыв. Это происходит потому, что с увеличением угла между направлением усилия и направлением пултрузии происходит значительное снижение сопротивления растяжению, чем сопротивления сдвигу и смятию, которое является оптимальным типом разрушения соединений.

Другие типы отказа (кроме смятия), приведенные на рис. 6, нежелательны, так как эти типы отказа происходят мгновенно и могут быть катастрофическими [20]. Определено, что болтовые соединения с двумя и тремя рядами болтов будут иметь еще более стремительный тип разрушения, наступающий либо от разрыва, либо от группы соединения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ существующих цельнокомпозитных конструкций показывает, что листовые фасонки выполнены или из стали, или из стеклопластика в двух направлениях волокон (0 и 90°). Однако в решетчатых конструкциях, где элементы примыкают под различными углами, нецелесообразно использовать цельную стеклопластиковую листовую фасонку. В узле А (рис. 5) элементы решетки примыкают к неразрезному верхнему поясу (пояс проходит через узел, не прерываясь) под различными углами. Прикрепление фасонки к поясу рассчитывается на равнодействующую усилий в элементах решетки, сходящихся в данном узле, стремящуюся сдвинуть фасонку относительно пояса. Варианты конструирования листовых фасонки на болтах в узле А приведены на рис. 7.

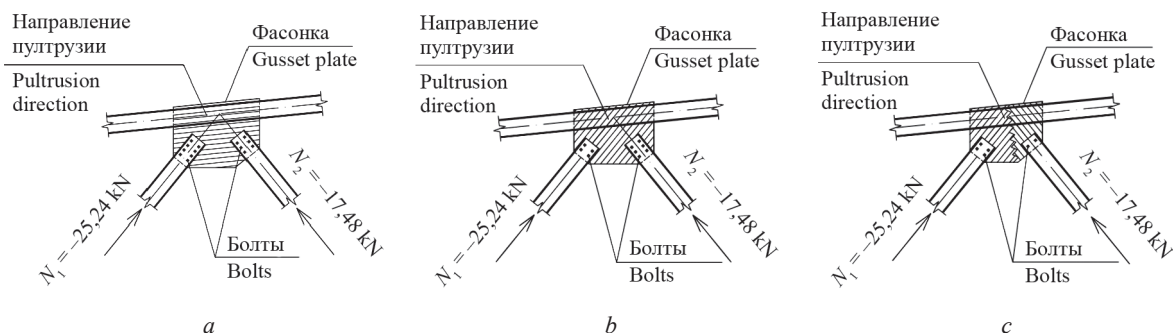


Рис. 7. Листовые фасонки на болтах в трапециевидной ферме (узел А): а — цельная фасонка с направлением пултрузии вдоль оси пояса; б — цельная фасонка с направлением пултрузии вдоль оси с максимальным усилием решетки; с — раздельная фасонка с направлением пултрузии вдоль оси примыкающих стержней решетки

Fig. 7. Gusset sheets on trapezoidal truss bolts (node A): a — solid gusset plate with pultrusion direction along the band axis; b — solid gusset plate with pultrusion direction along the axis with maximum frame stress; c — split gusset plate with pultrusion direction along the axis of the adjacent frame rods

Для экономии материала целесообразно выполнить раздельную фасонку, с ориентацией направления пултрузии вдоль оси каждого из примыкающих стержней решетки. Анализ расхода материалов по трем вариантам показывает, что в случае применения раздельной фасонки экономия материала составляет 55 % относительно первого варианта, 33 % относительно второго варианта, при этом несущая способность по прочности и деформативности обеспечена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В других случаях, отличающихся от вышеизложенного, например, когда есть разрезной верхний пояс или к поясу примыкает стойка, целесообразно фасонку по толщине выполнить из нескольких слоев. В табл. приведены различные варианты многослойных листовых фасонки.

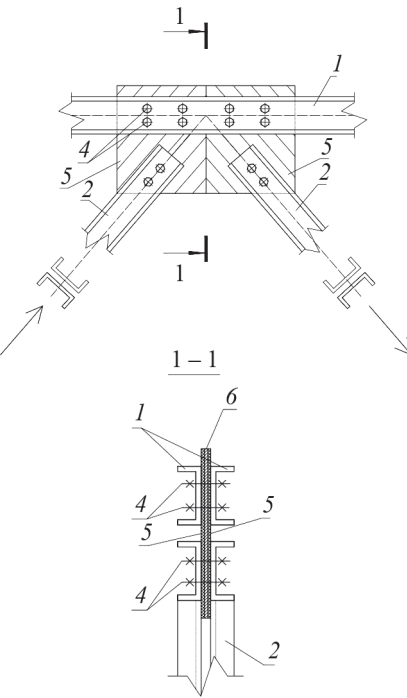
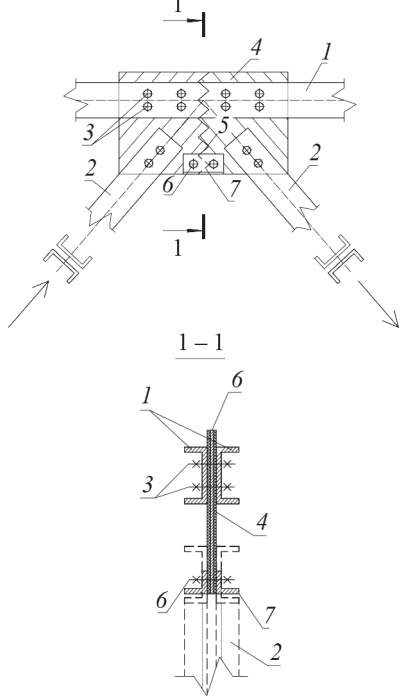
На основании проведенных исследований стоит отметить следующее:

1. Обосновано применение листовых фасонки из ПСП в решетчатых конструкциях, определена их действительная работа при эксплуатационных нагрузках. Решетчатая конструкция рассчитана с учетом ортотропного поведения материала.
2. Разработаны новые конструктивные решения узловых соединений в решетчатых конструкциях на листовых фасонках в зависимости от усилий, возникающих в элементах, и конструктивное решение, учитывающее особенности пултрузионного стеклопластика.
3. Замена традиционных материалов на композит без изменения конструктивной схемы и модернизации конструкции приводит к повышенной материалоемкости. Анализ расхода материалов по трем вариантам показывает, что в случае применения раздельной фасонки экономия материала составляет до 55 % относительно первого варианта, 33 % относительно второго варианта.

Табл. Варианты многослойных листовых фасонкок

Table. Multilayer gusset sheet options

№ п/п Item No.	Узлы на листовых фасонках Gusset sheet nodes	Описание Description
1		Узел соединения стеклопластиковых профилей в решетчатой конструкции включает: пояс 1; стержни решетки 2, соединенные внахлест многослойной фасонкой 3 на болтах 4. Крайние слои фасонки 3 выполнены из двух частей 5 с ориентацией пултрузии по оси стержней решетки 2, а средний слой выполнен из цельного тонкостенного стального листа 6. Зная ориентацию стеклопластиковых профилей решетчатой конструкции 1 и 2, определяют габариты фасонки 3, состоящей из трех слоев, при этом крайние слои выполняют из двух частей 5 с ориентацией пултрузии по направлению осей стержней решетки 2, а средний слой — из цельного тонкостенного стального листа, например, из оцинкованной тонкостенной стали Fiberglass profile connection nodes in frame structures include: band 1; frame rods 2 connected by overlap with the multilayer gusset plate 3 using the bolts 4. The outermost layers of the gusset plate 3 consist of two parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of frame rods 2, while the middle layer is made of a solid thin-wall steel plate 6. Given the orientation of the frame structure fiberglass profiles 1 and 2, the dimensions of the gusset plate 3, which consists of 3 layers, are determined, in addition to that, the outermost layers consist of two parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of the frame rods 2, while the middle layer is made of a solid thin-wall steel plate, e.g. of galvanized thin-wall steel
2		Узел соединения стеклопластиковых профилей в решетчатой конструкции включает: пояс 1, стержни решетки 2 соединены фасонкой 3 на болтах 4. Крайние слои фасонки 3 изготовлены из отдельных частей 5 с ориентацией пултрузии по оси стержней решетки 2. Средний слой 6 между крайними слоями фасонки выполнен цельным из тонкой оцинкованной листовой стали с выштампованными зубьями с каждой стороны. Изготавливается многослойная листовая фасонка 3, которая включает крайние слои из отдельных стеклопластиковых частей 5, ориентированных пултрузией в направлении осей стержней решетки 2 и соединяются цельным средним слоем 6, выполненным из тонкостенной листовой стали с выштампованными зубьями с каждой стороны. Укладываются пояса 1 и стержни решетки 2, которые внахлест объединяются многослойной фасонкой 3 и соединяются болтами 4 Fiberglass profile connection nodes in frame structures include: band 1; frame rods 2 connected using the gusset plate 3 with the bolts 4. Outermost layers of gusset plate 3 consist of separate parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of the frame rods 2. Middle layer 6 between the outermost gusset plate layers is solid and is made of thin galvanized sheet steel with the teeth stamped on each side. The multilayer gusset sheet 3 is produced; it includes the outermost layers from the separate fiberglass components 5, with the pultrusion orientation along the axis of the frame rod 2, which are connected using the solid middle layer 6 made of a solid thin-wall sheet steel with the teeth stamped on each side. Bands 1 and frame rods 2 are laid out; they are then combined with overlap using the multilayer gusset plate 3 and connected using bolts 4

№ п/п Item No.	Узлы на листовых фасонках Gusset sheet nodes	Описание Description
3		Узел соединения стеклопластиковых профилей в решетчатой конструкции включает пояс 1, стержни решетки 2, соединенные фасонкой 3 на болтах 4. Крайние слои фасонки 3 выполнены из отдельных частей 5 с ориентацией пултрusion по оси стержней решетки 2. Средний слой 6 между крайними слоями фасонки выполнен цельным из стеклопластика. При этом средний слой фасонки 6 соединен клеем 7 с крайними слоями 5 фасонки. Изготавливается многослойная листовая фасонка 3, которая включает крайние слои из отдельных стеклопластиковых частей 5, ориентированных пултрusion в направлении осей стержней решетки 2 и соединяющихся цельным средним слоем 6, выполненным из стеклопластика и соединенным с крайними слоями 5 фасонки клеем. Далее укладываются пояса 1 и стержни решетки 2, которые внахлест объединяются многослойной фасонкой 3 и соединяются болтами 4 Fiberglass profile connection nodes in frame structures include: band 1; frame rods 2 connected using the gusset plate 3 with the bolts 4. Outermost layers of gusset plate 3 consist of separate parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of the frame rods 2. Middle layer 6 between the outermost gusset plate layers consists of solid fiberglass. At the same time, the gusset plate middle layer 6 is connected to the outermost gusset plate layers 5 using glue 7. The multilayer gusset sheet 3 is produced; it includes the outermost layers from the separate fiberglass components 5, with the pultrusion orientation along the axis of the frame rod 2, which are connected using the solid middle layer 6 made of fiberglass and connected to the outermost gusset plate layers 5 with glue. After that, bands 1 and frame rods 2 are laid out; they are then combined with overlap using the multilayer gusset plate 3 and connected using bolts 4
4		Узел соединения стеклопластиковых профилей в решетчатой конструкции включает: пояс 1; стержни решетки 2, соединенные внахлест многослойной фасонкой 3 на болтах 4. Крайние слои фасонки 3 выполнены из двух частей 5 с ориентацией пултрusion по оси стержней решетки 2, а средний слой выполнен из цельного тонкостенного стального листа 6. Зная ориентацию стеклопластиковых профилей решетчатой конструкции 1 и 2, определяют габариты фасонки 3, состоящей из трех слоев, при этом крайние слои выполняют из двух частей 5 с ориентацией пултрusion по направлению осей стержней решетки 2, а средний слой — из цельного тонкостенного стального листа, например, из оцинкованной тонкостенной стали Fiberglass profile connection nodes in frame structures include: band 1; frame rods 2 connected by overlap with the multilayer gusset plate 3 using the bolts 4. The outermost layers of the gusset plate 3 consist of two parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of frame rods 2, while the middle layer is made of a solid thin-wall steel plate 6. Given the orientation of the frame structure fiberglass profiles 1 and 2, the dimensions of the gusset plate 3, which consists of 3 layers, are determined, in addition to that, the outermost layers consist of two parts 5 with the pultrusion orientation along the axis of the frame rods 2, while the middle layer is made of a solid thin-wall steel plate, e.g. of galvanized thin-wall steel

ЛИТЕРАТУРА

1. *Raghunathan M.D., Senthil R., Palani G.S.* On the tensile capacity of Single-bolted Connections between GFRP Angles and Gusset Plates-Testing and Modelling // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 21. Issue 6. Pp. 2259–2272. DOI: 10.1007/s12205-016-1102-4
2. *Boscato G., Russo S., Mottram J.T.* Design and free vibration of a large temporary roof FRP structure for the Santa Maria Paganica church in L'Aquila // *Proc., 6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*. IIFC (International Institute for FRP in Construction), Kingston, ON, Canada, 2012.
3. *Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Фахрутдинов А.Э.* Разработка и экспериментальные исследования конструкций навеса над трибунами из пултрузионных стеклопластиковых профилей // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 9 (729). С. 96–108. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-96-108
4. *Boscato G., Mottram J.T., Russo S.* Dynamic Response of a Sheet Pile of Fiber-Reinforced Polymer for Waterfront Barriers // *Journal of Composites for Construction*. 2011. Vol. 15. Issue 6. Pp. 974–984. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000231
5. *Adilardi A., Russo S.* Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance // *Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010. Pp. 2455–2459.
6. *Dicuonzo A., Laudiero F., Minghini F., Tullini N.* Design and construction of a temporary structure composed by FRP pultruded profiles // *Proc., 4th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 08)*. EMPA, Zurich, Switzerland, 2008.
7. *Boscato G., Russo S.* Free vibrations of a pultruded GFRP frame with different rotational stiffnesses of bolted joints // *Mechanics of Composite Materials*. 2013. Vol. 48. Issue 6. Pp. 655–668. DOI: 10.1007/s11029-013-9310-1
8. *Qureshi J., Mottram J.T.* Behaviour of pultruded beam-to-column joints using steel web cleats // *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 73. Pp. 48–56. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.019
9. *Qureshi J., Mottram J.T.* Response of beam-to-column web cleated joints for FRP pultruded members // *Journal of Composites for Construction*. 2014. Vol. 18. Issue 2. P. 04013039. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000392
10. *Фахрутдинов А.Э., Арипов Д.Н.* Несущие конструкции сооружений из пултрузионных стеклопластиковых профилей // *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сб. ст. II Всероссийской научно-технической конференции*. 2017. С. 281–294.
11. *Mottram J.T., Zafari B.* Pin-bearing strengths for bolted connections in fibre-reinforced polymer structures // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*. 2011. Vol. 164. Issue 5. Pp. 291–305. DOI: 10.1680/stbu.2011.164.5.291
12. *Turvey G.J.* Experimental and analytical investigation of two- and six-plate bonded splice joints on serviceability limit deformations of pultruded GFRP beams // *Composite Structures*. 2014. Vol. 111. Pp. 426–435. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.12.022
13. *Qureshi J., Mottram J.T.* Moment-rotation response of nominally pinned beam-to-column joints for frames of pultruded fibre reinforced polymer // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.057
14. *Feroldi F., Russo S.* Structural behavior of all-FRP beam-column plate-bolted joints // *Journal of Composites for Construction*. 2016. Vol. 20. Issue 4. P. 04016004. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000667
15. *Russo S.* Performance of a PFRP structure covering a historic building struck by an earthquake // *Proc., 5th Int. Conf. Advanced Composites in Construction*. NetComposites, Chesterfield, UK, 2011. Pp. 51–57.
16. *Russo S.* Experimental and finite element analysis of a very large pultruded FRP structure subjected to free vibration // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. Issue 3. Pp. 1097–1105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.003
17. *Russo S.* Damage assessment of GFRP pultruded structural elements // *Composite Structures*. 2013. Vol. 96. Pp. 661–669. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.09.014
18. *Turvey G.J., Wang P.* Thermal preconditioning study for bolted tension joints in pultruded GRP plate // *Composite Structures*. 2007. Vol. 77. Issue 4. Pp. 509–513. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.023
19. *Turvey G.J., Wang P.* Failure of pultruded GRP single-bolt tension joints under hot–wet conditions // *Composite Structures*. 2007. Vol. 77. Issue 4. Pp. 514–520. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.024
20. *Scott D.W., Anwar J.* Effect of temperature of the short-term and long-term behaviour of single-pin-bearing connections in pultruded FRP composites // *Proc., 8th Int. Conf. on Advanced Composites in Construction (ACIC 2017)*. NetComposites Ltd., Chesterfield, UK, 2017. Pp. 54–59.

Поступила в редакцию 20 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 17 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Далер Насимович Арипов — аспирант кафедры металлических конструкций и испытания сооружений; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1004265, ORCID: 0000-0002-5912-9672; aarchitector-1992@mail.ru;

Иван Леонидович Кузнецов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических конструкций и испытания сооружений; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 690298, Scopus: 57078042400, ResearcherID: G-5637-2019, ORCID: 0000-001-6838-0319; kuz377@mail.ru;

Марат Айдарович Салахутдинов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружений; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 825789, ResearcherID: G-4978-2019, ORCID: 0000-0002-9452-0271; Lider-kazann@yandex.ru.

REFERENCES

1. Raghunathan M.D., Senthil R., Palani G.S. On the tensile capacity of Single-bolted Connections between GFRP Angles and Gusset Plates-Testing and Modelling. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(6):2259-2272. DOI: 10.1007/s12205-016-1102-4
2. Boscato G., Russo S., Mottram J.T. Design and free vibration of a large temporary roof FRP structure for the Santa Maria Paganica church in L'Aquila. *Proc., 6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*. IIFC (International Institute for FRP in Construction), Kingston, ON, Canada, 2012.
3. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Aripov D.N., Fakhutdinov A.E. Development and experimental studies structures of the canopy over the stands from pultruded glass fiber reinforced profiles. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; 9(729):96-108. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-96-108 (rus.).
4. Boscato G., Mottram J.T., Russo S. Dynamic Response of a Sheet Pile of Fiber-Reinforced Polymer for Waterfront Barriers. *Journal of Composites for Construction*. 2011; 15(6):974-984. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000231
5. Adilardi A., Russo S. Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance. *Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010; 2455-2459.
6. Dicuonzo A., Laudiero F., Minghini F., Tullini N. Design and construction of a temporary structure composed by FRP pultruded profiles. *Proc., 4th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 08)*. EMPA, Zurich, Switzerland, 2008.
7. Boscato G., Russo S. Free vibrations of a pultruded GFRP frame with different rotational stiffnesses of bolted joints. *Mechanics of Composite Materials*. 2013; 48(6):655-668. DOI: 10.1007/s11029-013-9310-1
8. Qureshi J., Mottram J.T. Behaviour of pultruded beam-to-column joints using steel web cleats. *Thin-Walled Structures*. 2013; 73:48-56. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.019
9. Qureshi J., Mottram J.T. Response of beam-to-column web cleated joints for FRP pultruded members. *Journal of Composites for Construction*. 2014; 18(2):04013039. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000392
10. Fakhutdinov A.E., Aripov D.N. Bearing structures of structures made of pultruded fiberglass profiles. *Polymer composite materials and production technologies of a new generation: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2017; 281-294. (rus.).
11. Mottram J.T., Zafari B. Pin-bearing strengths for bolted connections in fibre-reinforced polymer structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*. 2011; 164(5):291-305. DOI: 10.1680/stbu.2011.164.5.291
12. Turvey G.J. Experimental and analytical investigation of two- and six-plate bonded splice joints on serviceability limit deformations of pultruded GFRP beams. *Composite Structures*. 2014; 111:426-435. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.12.022
13. Qureshi J., Mottram J.T. Moment-rotation response of nominally pinned beam-to-column joints for frames of pultruded fibre reinforced polymer. *Construction and Building Materials*. 2015; 77:396-403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.057
14. Feroldi F., Russo S. Structural behavior of all-FRP beam-column plate-bolted joints. *Journal of Composites for Construction*. 2016; 20(4):04016004. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000667
15. Russo S. Performance of a PFRP structure covering a historic building struck by an earthquake. *Proc., 5th Int. Conf. Advanced Composites in Construction*. NetComposites, Chesterfield, U.K., 2011; 51-57.
16. Russo S. Experimental and finite element analysis of a very large pultruded FRP structure subjected to free vibration. *Composite Structures*. 2012; 94(3):1097-1105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.003
17. Russo S. Damage assessment of GFRP pultruded structural elements. *Composite Structures*. 2013; 96:661-669. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.09.014

18. Turvey G.J., Wang P. Thermal preconditioning study for bolted tension joints in pultruded GRP plate. *Composite Structures*. 2007; 77(4):509-513. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.023

19. Turvey G.J., Wang P. Failure of pultruded GRP single-bolt tension joints under hot–wet conditions. *Composite Structures*. 2007; 77(4):514-520. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.024

20. Scott D.W., Anwar J. Effect of temperature of the short-term and long-term behaviour of single-pin-bearing connections in pultruded FRP composites. *Proc., 8th Int. Conf. on Advanced Composites in Construction (ACIC 2017)*. NetComposites Ltd., Chesterfield, UK, 2017; 54-59.

Received April 20, 2020.

Adopted in a revised form on June 17, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

B I O N O T E S: **Daler N. Aripov** — postgraduate student of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 1004265, ORCID: 0000-0002-5912-9672; architector-1992@mail.ru;

Ivan L. Kuznetsov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 690298, Scopus: 57078042400, ResearcherID: G-5637-2019, ORCID: 0000-001-6838-0319; kuz377@mail.ru;

Marat A. Salakhutdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 825789, ResearcherID: G-4978-2019, ORCID: 0000-0002-9452-0271; Lider-kazann@yandex.ru.

Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения

Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко, Д.Д. Заборова, О.С. Гамаюнова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования являются отдельные характеристики внешнего однослойного стенового ограждения толщиной 0,51 м из керамического полнотелого кирпича. Рассматриваются теплотехнические параметры стены, производится расчет активного и реактивного термических сопротивлений. Устанавливаются различия между двумя типами сопротивлений. Приводится пример расчета температурного пограничного слоя, в котором происходят все температурные колебания, и определения количества тепла, поглощаемого и выделяемого стеной.

Материалы и методы. Анализируется вопрос учета двух составляющих термического сопротивления за счет волновых функций — тепловой и температурной волн. Активное термическое сопротивление определяется в любой точке стенового ограждения при фиксированном значении параметра времени t (стационарный режим передачи тепла). При установлении полного сопротивления фиксируется координата. Для расчета толщины пограничного температурного слоя в стене рассматривается температурный перепад от -30 до 40 °C снаружи помещения, внутри помещения температура принимается 18 °C. Величина температурного перепада рассчитывается из отношения разности температур в данный момент к начальной. Необходимое количество тепла и отдача тепла вычисляются по стандартным формулам теплофизики.

Результаты. Доказано различие между активным и реактивным термическими сопротивлениями, которые в сумме составляют полное термическое сопротивление. Активное сопротивление всегда в 1,57 раз меньше общего. При этом активное сопротивление будет падать при уменьшении температурного перепада и увеличиваться в случае, когда температура снаружи помещения будет больше, чем внутри. Толщина температурного пограничного слоя всегда меньше половины толщины стены.

Выводы. По данной методике достаточно рассчитать активное термическое сопротивление стенового ограждения, чтобы найти остальные составляющие. Также, чем больше температурный перепад, тем толще температурный пограничный слой, т.е. все температурные изменения происходят только в данном слое, а остальная часть стены работает как накопитель тепла. Все накопленное тепло будет уходить в помещение при снижении температуры воздуха на улице. За счет такой стены можно отапливать помещение или направлять это тепло на различные включения в стене.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность, строительство, термическое сопротивление, стеновое ограждение, пограничный слой, температурный перепад, перенос тепла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С. Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1126–1134. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1126-1134

Determination of active and reactive thermal resistance of one-layer building envelopes

Tatiana A. Musorina, Mikhail R. Petrichenko, Daria D. Zaborova,
Olga S. Gamayunova

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

ABSTRACT

Introduction. The subject of the study is the individual characteristics of a 0.51 m thick external single-layer building envelope made of solid ceramic bricks. The paper focuses on the heat engineering parameters of the wall, namely, the calculation of active and reactive thermal resistances. We determine the differences between the two types of resistances. We also provide an example of calculating the thermal boundary layer in which all temperature fluctuations occur and determining the amount of heat absorbed and released by the envelope.

Materials and methods. We give consideration to taking into account the two components of thermal resistance based on wave functions — thermal and temperature waves. Active thermal resistance is determined at any point of the building envelope with a fixed time value t (stationary heat transfer mode). The coordinate is recorded when determining total resistance. To calculate the thickness of the envelope thermal boundary layer, the temperature differential from -30 to 40 °C outside the premises is considered, the temperature inside the premises is assumed to be 18 °C. The temperature differential value is calculated from the ratio of the difference between current temperatures and the initial value. The required heat quantity and heat output are calculated using standard thermal physics formulas.

Results. The difference between active and reactive thermal resistances, which together make up total thermal resistance, was proved. Active resistance is always 1.57 times less than total resistance. In this case, the active resistance will drop as the temperature differential decreases, and will increase when the outside temperature is higher than the temperature inside the premise. The thermal boundary layer thickness is always less than half of the envelope thickness.

Conclusions. Using this method, it is sufficient to calculate the active thermal resistance of the building envelope to determine the remaining values. In addition, the greater the temperature differential, the thicker the temperature boundary layer, i.e. all temperature changes occur only in this layer while the rest of the envelope functions as a thermal accumulator. When the outside ambient temperature drops, all accumulated heat will be transferred into the premise. Such an envelope can be used to heat the premise or to direct this heat to various envelope elements.

KEYWORDS: energy efficiency, construction, thermal resistance, building envelope, boundary layer, temperature differential, heat transfer

FOR CITATION: Musorina T.A., Petrichenko M.R., Zaborova D.D., Gamayunova O.S. Determination of active and reactive thermal resistance of one-layer building envelopes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1126-1134. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1126-1134 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

На стадии проектирования необходимо учитывать параметры ограждающих конструкций здания, а именно стеновых ограждений. Одними из главных параметров являются активное и реактивное термические сопротивления ограждения. Для каждого региона России существуют свои требования по нормам термического сопротивления. Отсутствие учета данного теплофизического параметра приводит к ухудшению работы стенового ограждения и нарушению комфортности микроклимата помещения. Для решения этого вопроса многие ученые России и Европы исследуют увеличение или занижение показателя термического сопротивления. Данный параметр зависит от коэффициента теплопроводности материала стены, от толщины стены и от коэффициентов теплообмена воздуха внутри и снаружи здания [1–4].

Реализация заданного термического сопротивления стеновой конструкции требует оценок термической устойчивости стены. Доказано, что повышения активного термического сопротивления (за счет уменьшения теплопроводности) не достаточно для такой оценки, и оно не характеризует термическое сопротивление стенового ограждения в условиях нестационарных температур воздуха внутри помещения и снаружи [5, 6].

Известно много материалов, которые в своей комбинации удовлетворяют требованиям СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий¹. Однако реактивная (аккумулирующая и инерционная) составляющая практически не используется. При выборе материала конструкции необходимо учесть технические и санитарно-гигиенические критерии. В течение отопительного периода здание из пористых материалов прогревается быстро, как и остывает. Из-за пористости материала перепад темпе-

ратур может приводить к трещинообразованию в ограждающей конструкции [7–9].

Активное термическое сопротивление (R_a) стенового ограждения отвечает за стационарные режимы передачи тепла. В установившемся режиме накопительная способность стеновых конструкций равна нулю по условию неразрывности теплового потока. Она определяется количеством тепла, поглощаемого и пропускаемого ими. В большинстве случаев режимы отопления — нестационарные, поэтому необходимо учитывать реактивное сопротивление (R_r) стены, состоящее из емкостного сопротивления стены и ее тепловой инерции (теплоустойчивости). Следует корректно определить термическое сопротивление однородного стенового ограждения в условиях одномерного и не одномерного тепловых потоков [10].

Следовательно, не везде учитывается реактивная составляющая термического сопротивления, и потребителю необходимо переплачивать за отопление, а во всех регионах России отопление стоит достаточно дорого.

В данной статье будут рассматриваться вопросы учета двух составляющих сопротивления, а также определение необходимого количества тепла, поглощаемого стеной, и количества тепла, которое стеновое ограждение может удержать в запасе.

Цель работы: расчет активного и реактивного термических сопротивлений в однослойном стеновом ограждении жилого здания.

Для этого будут рассмотрены следующие задачи:

1. Установление различия между активным и реактивным термическими сопротивлениями
2. Пример расчета зависимости изменения толщины температурного слоя от изменения внешней температуры. По результатам расчета построен график зависимостей отношений перепада температур и толщины температурного слоя.
3. Расчет теплотехнических характеристик стенового ограждения: количество тепла, поглощаемого стеной и выделяемого ею при разном перепаде температур.

¹ Тепловая защита зданий (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением № 1)): (СП 50.13330.2012) : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 265 и введен в действие с 1 июля 2013 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Строительство дома начинается на этапе проектирования, важной частью которого является расчет толщины стен. Для каждого типа климата предусмотрены определенные технические нормы, выполнение которых гарантирует жильцу приемлемые условия проживания в доме. Определяющим показателем является такой параметр, как термическое сопротивление [11, 12]. В России принято определять термическое сопротивление согласно нормативным документам.

В.Г. Гагарин доказал, что практически все мероприятия по энергосбережению в зданиях сводятся к увеличению требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Современные нормативные значения теплозащиты стен достигли величин, которые трудновыполнимы на практике, и дальнейшее их увеличение не приведет к повышению энергоэффективности. Из его работ также следует, что понижение нормативного сопротивления в районе единицы мало влияет на изменение теплопотерь через ограждающие конструкции при условии выполнения норматива по удельному расходу энергии на отопление [13–16].

В работах С.В. Корниенко [17–20] сделан вывод о том, что повышение требований по влагозащите ограждающих конструкций при использовании расчетных значений температуры и относительной влажности внутреннего воздуха, согласно российской норме СП 50.13330.2012, не всегда целесообразно. Учет изменения параметров микроклимата в помещениях позволяет более точно оценить влагозащитные свойства ограждающих конструкций в процессе их проектирования.

Исходя из результатов, приводимых в [10], термические сопротивления (полное, активное и реактивное) в эйлеровских координатах определяются так:

$$R := \frac{\delta\theta}{\delta q} = \frac{\partial(\theta, y)}{\partial(q, y)} = \left(\frac{\partial\theta}{\partial q} \right)_y,$$

$$R_a = \frac{\partial(\theta, t)}{\partial(q, t)} = \left(\frac{\partial\theta}{\partial q} \right)_t,$$

$$R_r := R - R_a,$$

где $\theta = \theta(t, y) := T_0 - T = \Delta T$ — перепад температур, отсчитываемый от температуры горячей поверхности; q — плотность теплового потока, $q = q(t, y)$; y — координата, отсчитываемая поперек стенового ограждения по направлению распространения потока тепла; t — время, символом δ обозначено полное изменение переменной, по определению:

$$\delta z = \frac{\partial z}{\partial t} \delta t + \frac{\partial z}{\partial y} \delta y, \quad z = q, \theta.$$

Активное термическое сопротивление определяется в любой точке стенового ограждения

при фиксированном значении параметра времени t (стационарный режим передачи тепла). При расчетах полного сопротивления время не фиксируется, но фиксируется координата.

Перепад температур и плотность теплового потока определены на множестве значений времени и координаты ($t \in T, y \in Y$). В переменных Лагранжа (лагранжевы частицы — волны температуры и теплового потока) сопротивление стены допускает определение, эквивалентное эйлеровскому:

$$R_a = \frac{1}{\rho C w_T} = \frac{\delta_T}{\lambda}, \quad R = \frac{1}{\rho C w_q} = \frac{\delta_q}{\lambda},$$

где w_T, w_q — скорости распространения температурной волны и волны теплового потока, определяемые стандартно: $w_T := -(\partial y / \partial t)_T, w_q := -(\partial y / \partial t)_q$. Линейные масштабы δ_T, δ_q — толщины температурного и теплового пограничных слоев теплопроводного ограждения определяются как *носители распределений* θ и q . На этих отрезках $0 < y < \delta_T, 0 < y < \delta_q$ сосредоточены распределения $\theta(t, y)$ и $q(t, y)$, соответственно.

Термические сопротивления сосредоточены в пограничных слоях, а именно в температурном и тепловом. Толщина пограничных слоев определяется так:

$$\delta_T := \frac{1}{\theta_0} \int_0^\infty \theta(t, y) dy, \quad \delta_q := \frac{1}{q_0} \int_0^\infty q(t, y) dy,$$

причем выполняются условия равенства волновых чисел Пекле:

$$\frac{w_T \delta_T}{a} = \frac{w_q \delta_q}{a} = 1,$$

где a — коэффициент температуропроводности, $a := \lambda / (\rho c)$.

Значит, отношение термических сопротивлений, полного и активного, удовлетворяет пропорциям:

$$\frac{R}{R_a} = \frac{w_r}{w_q} = \frac{\delta_q}{\delta_T}.$$

Другое определение активного и полного термических сопротивлений имеет вид:

$$\frac{\delta_T}{\delta} = \frac{\partial_t^{-1/2} \theta_0}{\theta_0}, \quad \frac{\delta_q}{\delta} = \frac{\theta_0}{\partial_t^{1/2} \theta_0},$$

где $\theta_0 = \theta(t, 0)$ — перепад температур на грани $y = 0$.

Из этих формул получается, что отношение термических сопротивлений имеет вид:

$$\frac{R}{R_a} = \frac{\theta_0^2}{(\partial_t^{-1/2} \theta_0)(\partial_t^{1/2} \theta_0)}.$$

Тогда справедливы следующие результаты:

- для стационарного (медленно изменяющегося) температурного режима однородной стены отношение толщины температурного слоя к общей толщине стены, отношение толщины теплового

слоя к общей толщине стены и отношение полного и активного сопротивления имеют следующий вид:

$$\frac{\delta_T}{\delta} = \frac{1}{2}, \quad \frac{\delta_q}{\delta} = 1, \quad \frac{R}{R_a} = 2;$$

• для стационарного (медленно изменяющегося) температурного режима неоднородной стены с непрерывно изменяющимся коэффициентом теплопроводности ($\lambda = \lambda(y)$) отношения имеют вид:

$$\frac{\delta_T}{\delta} = 1 - \frac{\int_0^1 \frac{y dy}{\lambda(y)}}{\left(\int_0^1 \frac{dy}{\lambda(y)} \right)} < 1, \quad \frac{\delta_q}{\delta} = 1, \quad \frac{\delta_q}{\delta_T} = \frac{\delta}{\delta_T} > 1;$$

• причем представленные пропорции и неравенства не зависят от значения температуры на грани (θ_0) и определяются только распределением коэффициента теплопроводности по толщине стены;

• для полуограниченной стены ($y > 0$) и мгновенного изменения температурного напора в момент времени в точке $y = 0$: $\delta_T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{at}$, $\delta_q = \sqrt{\pi at}$, $\delta_T/\delta_q = \pi/2$ можно доказать, что $wT = \delta T/(2t)$, а скорость тепловой волны в $\pi/2$ раз меньше. Тогда время заполнения температурным пограничным слоем стены толщиной δ составит $\tau_0 = \frac{\pi \delta^2}{4a}$.

Такова длительность переходного процесса при мгновенном изменении температуры на одной из граней. Следовательно, недостаточно иметь малую λ , нужно иметь большое значение произведения ρc ;

• для полуограниченной стены и периодического изменения температуры в точке $y = 0$, обозначив период изменения температуры t_0 , для глубины проникновения температурной волны получим $\delta_T = \sqrt{\frac{at_0}{\pi}}$. Для теплоустойчивости необходимо выполнение неравенства $\delta_T < \delta$, тогда температурная волна не успеет пробежать всю толщину стены.

Исходя из этой формулы для температурного пограничного слоя можно записать:

$$\delta_t = \frac{\delta(T_0 - T_1)}{2(T_0 - T_1)_{\text{нач}}}.$$

Тогда активное, реактивное и полное термические сопротивления можно представить как

$$R_a = \frac{1}{a_{\text{int}}} + \frac{\delta_t(x)}{\lambda} + \frac{1}{a_{\text{ext}}}.$$

Для термически толстой стены, где температурный слой всегда меньше общей толщины $\delta_t \ll \delta$, выполняются тождества

$$R = R_a \cdot \frac{\pi}{2};$$

$$R_r := R - R_a.$$

Следовательно, достаточно рассчитать активное термическое сопротивление, чтобы найти остальные составляющие. Реактивное термическое сопротивление возрастает с увеличением $\lambda \rho c$. Стеновое ограждение, обладающее большим активным термическим сопротивлением, как правило, термически неустойчиво и обладает малой тепловой емкостью [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пример расчета. Рассмотрим стену из керамического полнотелого кирпича толщиной 510 мм. Перепад температур снаружи помещения — от -30 до 40 °С. Температура внутри помещения остается неизменной — 18 °С. Термическое сопротивление для данной стены, которое рассчитывается по нормам, равно $R = 0,897 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Данная величина никак не связана с колебанием температур внутри и снаружи помещения. По методике, представленной выше, необходимо рассчитать, как будет себя вести стеновое ограждение, и определить его теплотехнические характеристики при максимальном перепаде температур. Данные представлены в табл. 1.

Табл. 1. Изменение теплотехнических характеристик в зависимости от внешней температуры

Table 1. Changes in thermal characteristics based on the ambient temperature

Температура, °С Temperature, °C	$R_a, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ $R_a, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/W}$	$R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ $R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/W}$	$R_r, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ $R_r, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/W}$	$\Delta t, \text{ м} / \delta_r, \text{ м}$ $\Delta t, \text{ m} / \delta_r, \text{ m}$
-30	0,528	0,829	0,301	0,255
0	0,297	0,466	0,169	0,095
18	0,158	0,248	0,09	0*
40	0,328	0,515	0,187	-0,116**

Примечания: * При одинаковой температуре внутри и снаружи помещения стена не реагирует на температурные колебания, и температурный пограничный слой отсутствует.

** Если температура снаружи выше, чем температура внутри помещения, то тепловой поток меняет направление, и тепло направляется в помещение.

Note: * If the temperature is the same inside and outside the premises, the wall does not respond to temperature fluctuations, and there is no temperature boundary layer.

** If the temperature is higher outside than inside the premises, then the heat flow changes its direction and heat moves into the premises.

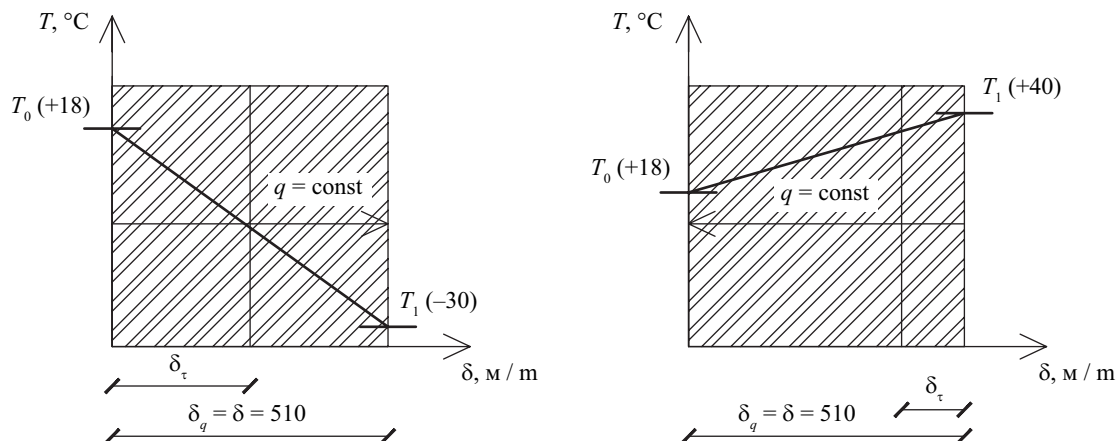


Рис 1. Разрез стенового ограждения

Fig. 1. Building envelope cross-section

На рис. 1 представлен разрез стены и месторасположение температурного пограничного слоя при отрицательной и положительной температурах снаружи помещения.

По результатам расчетов можно построить график зависимости отношения толщины температурного пограничного слоя к полной толщине стены от отношения температурных перепадов (рис. 2).

Исходя из расчетов, можно сделать следующий вывод: чем больше температурный перепад, тем больше температурный пограничный слой, т.е. все температурные изменения происходят только в данном слое, остальная часть стены работает как накопитель тепла. При этом активное сопротивление будет падать при уменьшении температурного перепада и увеличиваться в случае,

когда температура снаружи будет выше, чем внутри (рис. 3).

Температурные изолинии в стеновых конструкциях с достаточно сложной геометрической конфигурацией представляются двумерным температурным полем и, как правило, не параллельны поверхностям ограждения, а криволинейны.

Внешние тепловые нагрузки (разность температур и их значения) в условиях установившейся теплопередачи неизменны или учитываются таковыми с целью облегчения расчетов на процессы передачи тепла. Данные процессы без дополнительных погрешностей можно применять к установившимся условиям теплопередачи. В реальных условиях внешние тепловые нагрузки, как и наружные температуры, изменяются по времени, что, в свою

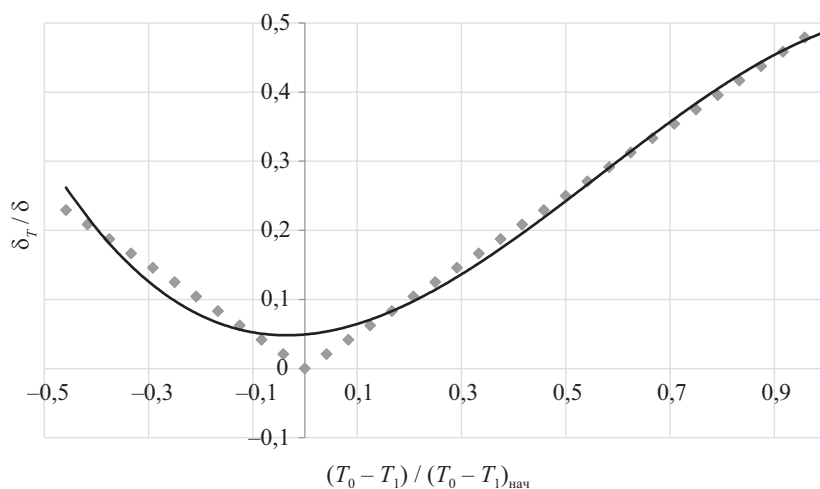


Рис. 2. График зависимости отношения температурного пограничного слоя к полной толщине стены от отношения температурных перепадов

Fig. 2. Graph of temperature boundary layer to full envelope thickness ratio based on temperature differential ratio

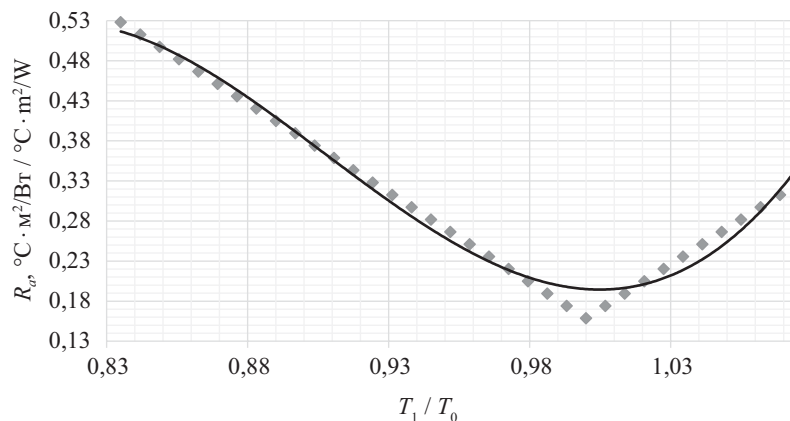


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления от отношения температур
Fig. 3. Dependence of active resistance to temperature ratio

очередь, приводит к нестационарной теплопередаче и изменению температурного поля.

Необходимо рассчитать, какое количества тепла необходимо стеновому ограждению и сколько тепла стена может выделить (отдать) при разных значениях разности температур внутри и снаружи помещения. Поток тепла Q , проходящий через любое сечение однородной конструкции, прямо пропорционален произведению разности температур ΔT на ее поверхность и площади стенового ограждения и обратно пропорционален активному термическому сопротивлению. В расчетах указывается R_a , так как режим стационарный. Формула будет иметь вид:

$$Q = \frac{\Delta TS}{R_a}.$$

Также необходимо определить, какое количество тепла может отдавать нагретая стена (аккумулируемое тепло) в помещение или наружу:

$$Q' = mc_{cp}(T_{hot} - T_0),$$

где m — масса 1 м² стены; c_{cp} — средняя теплоемкость стены; T_0 — минимальная комфортная температура внутри жилого помещения. Необходимо обратить внимание на температуру T_{hot} — это темпе-

ратура на горячей поверхности стены (внутри помещения). Она рассчитывается двумя способами: если тепловой поток идет из помещения $T_{hot} = T_0 - Q/\alpha_{int}$, если тепловой поток идет с улицы в помещение $T_{hot} = T_0 + Q/\alpha_{int}$. В табл. 2 приведены результаты расчетов количества поглощаемого и выделяемого стеной тепла. Температуру воздуха внутри помещения T_0 принимаем также равной 18 °С.

Из табл. 2 видно, что 1 м² стены при сильных перепадах (при отрицательных температурах снаружи) будет возвращать максимальное количества тепла в помещение при отключении отопления. Это говорит о том, что данная кирпичная стена будет иметь максимальное значение для определения денежных затрат на отопление.

В дальнейшем необходимо разобраться, как будут вести себя многослойные стеновые ограждения при различных перепадах температур, и чему будут равны их теплотехнические характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По представленной методике достаточно рассчитать активное термическое сопротивление стенового ограждения, чтобы найти остальные тепло-

Табл. 2. Расчетное значение количества тепла
Table 2. Calculated value of heat quantity

Температура T_{ext} , °C / Temperature T_{ext} , °C	Q , Вт/м ² / Q , W/m ²	T_{hot} , °C	Q' , кДж/м ² / Q' , kJ/m ²
-30	90,91	7,55	7700,83
0	60,60	11,03	5133,62
18	0	18	0
40	-67,11*	25,71	5684,94

Примечание: * Отрицательное значение количества тепла показывает, что, если температура снаружи помещения выше, чем внутри, стена не нуждается в дополнительном тепле и справляется с температурным перепадом.

Note: * The negative amount of heat shows that if the temperature outside the premises is higher than inside the premises, the wall does not need any supplementary heat and it is not affected by the temperature difference.

технические характеристики. При этом активное сопротивление будет падать при уменьшении температурного перепада и увеличиваться в случае, когда температура снаружи помещения будет выше, чем внутри. Исходя из расчетов, можно сделать вывод: чем больше температурный перепад, тем больше температурный пограничный слой, т.е. все тем-

пературные изменения происходят только в данном слое. Остальная часть стены работает как накопитель тепла. Все накопленное тепло будет уходить в помещение, если на улице будет понижаться температура. За счет данной стены можно отапливать помещение или затрачивать это тепло на различные включения в стеновом ограждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rusanov A.E., Baiburin A. Kh., Baiburin D.A., Bianco V. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 95 (3). Pp. 57–65. DOI: 10.18720/MCE.95.6
2. Самарин О.Д. Периодические температурные колебания в цилиндрическом слое при большой толщине стенки // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 1 (85). С. 51–58. DOI: 10.18720/MCE.85.5
3. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. Влияние внешних воздействий на теплофизические и длительные механические свойства минераловатных плит // *Вопросы современной науки и практики*. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 1 (50). С. 125–134.
4. Ярцев В.П., Мамонтов А.А. Сравнительный анализ эффективности применения утеплителей в каркасном домостроении // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2016. № 6. С. 32–35.
5. Rybakov V.A., Ananeva I.A., Pichugin E.D., Garifullin M. Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 94 (2). Pp. 11–20. DOI: 10.18720/MCE.94.2
6. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer // *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. Vol. 156. P. 106461. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461
7. Алексеенко В.Н., Михеева Ю.Л. Воздействия климатических факторов на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций православных храмов XVIII–XIX веков // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2017. № 1 (17). С. 20–28.
8. Gumerova E., Gamayunova O., Shilova L. The optimal decision of insulation in cladding structures for energy efficient buildings // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. P. 06020. DOI: 10.1051/mateconf/201710606020
9. Gamayunova O., Radaev A., Petrichenko M., Shushunova N. Energy audit and energy efficiency of modular military towns // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01088. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001088
10. Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С., Петриченко М.Р. Термическое сопротивление однородного стенового ограждения // *Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках* : мат. XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М. : Шанс, 2019. С. 209–211.
11. Al-Tamimi A.S., Al-Amoudi O.S.B., Al-Osata M.A., Ali M.R., Ahmad A. Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 254. P. 119300. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119300
12. Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2015. Vol. 60. Issue 60. Pp. 44–55. DOI: 10.5862/MCE.60.6
13. Гagarин В.Г., Zubarev K.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4 (127). С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495
14. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. P. 03014. DOI: 10.1051/mateconf/201817003014
15. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Unsteady-state moisture behavior calculation for multilayer enclosing structure made of capillary-porous materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 177. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012021
16. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. The moisture regime calculation of single-layer enclosing structures on the basis of the discrete-continuum method application // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. P. 012105. DOI: 10.1088/1757-899x/456/1/012105
17. Корниенко С.В. Учет формы при оценке теплозащиты оболочки здания // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2013. № 5 (10). С. 20–27.
18. Корниенко С.В. Проблемы теплозащиты наружных стен современных зданий // *Интернет-*

Вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. 2013. № 1 (25). С. 13. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1\(25\)_1.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1(25)_1.pdf)

19. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ 2016. № 11. С. 132–145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145

20. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка теплозащиты эксплуатируемых жилых зданий из газобетонных блоков // Энергосбережение. 2016. № 6. С. 32–35.

21. Козинец Г.Л., Локтионова Е.А., Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Термическое сопротивление однородной изотропной теплопроводной среды // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16 (68). С. 105–110.

Поступила в редакцию 15 июня 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 июля 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Александровна Мусорина — аспирант Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства (ВШГиЭС), Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 8777-8361, Scopus: 57189345350, ORCID: 0000-0002-8380-0067; tamusorina@mail.ru;

Михаил Романович Петриченко — доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства (ВШГиЭС), Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 7779-4938, Scopus: 56426211200, ORCID: 0000-0002-3541-0072; fonpetrich@mail.ru;

Дарья Дмитриевна Заборова — аспирант Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства (ВШГиЭС), Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 9635-4579, Scopus: 57190854628, ORCID: 0000-0002-8346-549X; zaborova-dasha@mail.ru;

Ольга Сергеевна Гамаюнова — старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства (ВШПГиДС), Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6755-0189, Scopus: 56434269200, ResearcherID: P-8569-2019, ORCID: 0000-0002-7421-3434, Google Scholar ID: [hlGmBdoAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=GmBdoAAAAJ); 9658825@mail.ru.

REFERENCES

1. Rusanov A.E., Baiburin A. Kh., Baiburin D.A., Bianco V. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 95(3):57-65. DOI: 10.18720/MCE.95.6

2. Samarin O.D. The periodic temperature oscillations in a cylindrical profile with a large thickness. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 85(1):51-58. DOI: 10.18720/MCE.85.5 (rus.).

3. Yartsev V.P., Mamontov A.A., Mamontov S.A. The influence of external factors on thermo-physical and continual mechanical properties of mineral wool boards. *Problems of Contemporary Science and Practice Vernalsky University*. 2014; 1(50):125-134. (rus.).

4. Yartsev V.P., Mamontov A.A. Comparative analysis of the application efficiency of heat insulating materials in frame construction. *Roofing and Insulation Materials*. 2016; 6:32-35. (rus.).

5. Rybakov V.A., Ananev I.A., Pichugin E.D., Garifullin M. Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 94(2):11-20. DOI: 10.18720/MCE.94.2

6. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020; 156:106461. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461

7. Alekseenko V.N., Mikheyeva Y.L. Effects of climatic factors on the temperature and humidity conditions fencing structures orthodox churches XVIII–XIX centuries. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2017; 1(17):20-28. (rus.).

8. Gumerova E., Gamayunova O., Shilova L. The optimal decision of insulation in cladding structures for energy efficient buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:06020. DOI: 10.1051/matec-conf/201710606020

9. Gamayunova O., Radaev A., Petrichenko M., Shushunova N. Energy audit and energy efficiency of modular military towns. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:01088. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001088

10. Musorina T.A., Zaborova D.D., Gamayunova O.S., Petrichenko M.R. Thermal resistance homogeneous enclosure structure. *Problems of gas dynamics*

and heat and mass transfer in power plants : materials of the XXII School-Seminar of Young Scientists and Specialists under the direction of Academician A.I. Lentyev. Moscow, Chance publ., 2019; 209-211. (rus.).

11. Al-Tamimi A.S., Al-Amoudi O.S.B., Al-Osta M.A., Ali M.R., Ahmad A. Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks. *Construction and Building Materials*. 2020; 254:119300. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119300

12. Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 60(60):44-55. DOI: 10.5862/MCE.60.6

13. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):(127):484-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495 (rus.).

14. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:03014. DOI: 10.1051/mateconf/201817003014

15. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Unsteady-state moisture behavior calculation for multilayer enclosing structure made of capillary-porous materials. *IOP Conference Series: Earth and Environ-*

mental Science. 2018; 177:012021. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012021

16. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. The moisture regime calculation of single-layer enclosing structures on the basis of the discrete-continuum method application. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. 2018; 456:012105. DOI: 10.1088/1757-899x/456/1/012105

17. Korniyenko S.V. The accounting of the form at the assessment of the thermal performance of the envelopes. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013; 5(10):20-27. (rus.).

18. Kornienko S.V. Problems of thermal protection of external walls of modern buildings. *Internet-Vestnik VolgGASU. Series: Multi-Topic*. 2013; 1(25):13. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1\(25\)_1.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1(25)_1.pdf) (rus.).

19. Kornienko S.V. Specification of indoor climate design parameters at the assessment of moisture protective properties of enclosing structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 11:132-145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145 (rus.).

20. Kornienko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of thermal protection of operated residential buildings made of aerated concrete blocks. *Energy Saving*. 2016; 6:32-35. (rus.).

21. Kozinets G.L., Loktionova E.A., Musorina T.A., Petrichenko M.R. Thermal resistance of homogeneous isotropic heat-conducting medium. *Construction and Industrial Safety*. 2019; 16(68):105-110. (rus.).

Received June 15, 2020.

Adopted in a revised form on July 7, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: **Tatiana A. Musorina** — postgraduate student of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 8777-8361, Scopus: 57189345350, ORCID: 0000-0002-8380-0067; tamusorina@mail.ru;

Mikhail R. Petrichenko — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 7779-4938, Scopus: 56426211200, ORCID: 0000-0002-3541-0072; fonpetrich@mail.ru;

Darya D. Zabarova — postgraduate student of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 9635-4579, Scopus: 57190854628, ORCID: 0000-0002-8346-549X; zabarova-dasha@mail.ru;

Olga S. Gamayunova — senior lecturer of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 6755-0189, Scopus: 56434269200, ResearcherID: P-8569-2019, ORCID: 0000-0002-7421-3434, Google Scholar ID: [hlGmBdoAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=GmBdoAAAAJ); 9658825@mail.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 628.4:504.06

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146

Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора

К.Л. Чертес¹, Н.И. Шестаков²

¹Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия;

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИИ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье выполнен анализ некоторых биопозитивных технологий, применяемых для переработки или утилизации отходов на основе строительных материалов, осадков городских сточных вод, а также ряда пастообразных шламов органо-минеральной природы. Актуальность данного направления исследований подтверждается стабильно увеличивающимся ростом публикаций и существующими государственными программами, направленными на решение подобных вопросов. В работе обобщены результаты исследований по обработке отходов различного генезиса.

Материалы и методы. Используется теоретический анализ научной литературы и патентов на изобретения, а также общедоступных технологий, применяемых для переработки или утилизации отходов. Представлен подбор биопозитивных технологий, основанных на химической природе материала и его эксплуатационной группе. Выявлены наиболее эффективные для конструкционных материалов биопозитивные технологии, направленные на переработку конструкций во вторичные сырьевые компоненты. Показан пример реализации биопозитивной технологии для обезвреживания осадков городских очистных сооружений совместно с горячими отходами гидролизной промышленности, а также технологии переработки материалов специального назначения, таких как теплоизоляционные и гидроизоляционные.

Результаты. Рассмотрена возможность применения водно-органических эмульсий как активного компонента для эффективной регенерации асфальтогранулобетонных смесей. Определены составы, концентрации и седиментационная устойчивость таких эмульсий. Описаны результаты исследования физико-механических и гидрофизических свойств асфальтобетонгранулята, обработанного водно-органическими эмульсиями. Такая технология регенерации позволяет восстанавливать вяжущие свойства битума на поверхности асфальтобетонгранулята и устраивать из полученного композита нижние слои дорожных покрытий.

Выводы. Представленные биопозитивные технологии дают возможность эффективно и рационально перерабатывать или утилизировать широкий спектр отходов коммунально-строительного сектора в конструкции и продукты различного назначения. В качестве таких технологий рассматриваются: рециклинг, компостирование и плазменные технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биопозитивные технологии, строительные отходы, плазменные технологии, плазматрон, компостирование, жизненный цикл, рециклинг, регенерация, рекуперация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чертес К.Л., Шестаков Н.И. Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1135–1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146

Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries

Konstantin L. Chertes¹, Nikolay I. Shestakov²

¹Samara State Technical University (SSTU); Samara, Russian Federation;

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In this article the analysis of certain biopositive technologies applied to processing or recycling of construction waste, municipal sewage, and paste-like slurries of organo-mineral nature is performed. The relevance of this research is confirmed by the steadily growing number of publications and currently implemented government programmes aimed at solving such problems. The paper summarizes the results of research into the treatment of wastes having different origin.

Materials and methods. The analysis of the research literature and patents for inventions, as well as publicly available technologies used in waste processing and recycling is performed. Selection of biopositive technologies based on the chemical nature of materials and their groups is described. Biopositive technologies, most effectively applied to construction materials, are identified for the purpose of converting engineering structures into secondary raw components. The co-authors demon-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15, Выпуск 8, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 8, 2020

strate the application of a biopositive technology to sludge decontaminated at municipal waste water treatment plants and to hot waste generated by the hydrolysis industry, as well as technologies used to process special thermal insulation and waterproofing materials.

Results. The use of water-organic emulsions as active components in effective regeneration of asphalt granulated concrete mixtures is considered. Compositions, concentrations and sedimentation stability of such emulsions have been identified. The results of the study of physical, mechanical and hydro-physical properties of the asphalt-concrete granulate treated with water-organic emulsions are described. This regeneration technology helps bitumen to restore binding properties on the surface of the asphalt-concrete granulate and makes this composite applicable as a material designated for the bottom layers of the road pavement.

Conclusions. These biopositive technologies make it possible to efficiently and rationally process or recycle a wide range of municipal and construction waste into structures and products having various applications. Recycling, composting and plasma technologies are considered in this case.

KEYWORDS: biopositive technologies, construction waste, plasma technologies, plasmatron, composting, life cycle, recycling, regeneration, recovery

FOR CITATION: Chertes K.L., Shestakov N.I. Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1135-1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире поддерживается стабильный интерес к повышению эффективности обезвреживания и утилизации отходов коммунально-строительного сектора. Данные отходы образуются на всех этапах жизненного цикла строительства — от подготовки территории до объектного демонтажа изношенных зданий и сооружений. В коммунальном секторе отходы формируются при водоподготовке и очистке городских сточных вод в виде осадков. Коммунально-строительные отходы и, в частности, твердые коммунальные отходы (ТКО), являются преобладающими, что создает целый ряд проблем, сопряженных с экологической безопасностью геосферных оболочек.

Большинство отходов содержит в своем составе разлагаемую органическую фракцию.

Усовершенствованные методы разложения, такие как компостирование, аэробная стабилизация, биодеструкция, химическая минерализация, можно отнести к биопозитивным технологиям обращения с органоминеральными отходами.

В стандартах, принятых разными странами и Международной организацией стандартов ISO, нет точного определения термина «биопозитивные технологии», однако некоторые ученые выдвинули ряд предполагаемых формулировок. В частности, А.Р. Териор еще в 1998 г. в своей работе не дает конкретного определения биопозитивным технологиям, но достаточно подробно раскрывает ряд смежных понятий. Например: «биопозитивность зданий и инженерных сооружений — это интегральное понятие, включающее в себя основные требования к природосберегающим и природовосстанавливающим объектам» или «биопозитивными можно назвать строительные материалы из возобновимых природных ресурсов, не оказывающие негативного действия на человека, не загрязняющие природную среду при их изготовлении, требующие минимальных затрат энергии в процессе изготовления, пол-

ностью рециклируемые или разлагающиеся после выполнения функций подобно материалам живой природы» [1]. Авторы [2–8] описывают биопозитивное совершенствование материалов как применение рециклируемых материалов с многократным использованием ресурсов в строительстве для приближения строительных материалов к природным малоотходным технологиям, при которых необходимо делать замкнутые круговые циклы. В работах [9–13] определение биопозитивности формируется по критериям обеспечения экологической безопасности совместно с минимальными экономическими потерями.

Таким образом, биопозитивные технологии переработки строительных материалов — это комплексная система уменьшения их негативного воздействия на окружающую среду, состоящая из рациональных и эффективных технологий обезвреживания и переработки материалов, с минимальными выбросами в окружающую среду, производимыми выделениями, использованием ограниченного пространства и энергии, а также образованием побочных продуктов либо без них. Обзор вариантов применения биопозитивных технологий и потенциальный объем отходов, производимых в год, на примере г. Москвы представлен в табл. 1.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Анализируя данные табл. 1, можно заметить, что к биопозитивным технологиям в большей степени относится рециклинг, однако не все многоотходные отходы можно подвергать повторному использованию. В настоящее время отходы строительного производства и сноса в большинстве своем утилизируются путем размещения на специальных отведенных территориях для захоронения. Строительные материалы конструкционного назначения, например железобетон, бетон, керамический кирпич и др., после демонтажа используются в ос-

Табл. 1. Сводная таблица классифицированных отходов коммунально-строительного сектора и применяемых биопозитивных технологий для их переработки

Table 1. Summary table of classified municipal and construction waste and biopositive technologies applied for their processing

№ No.	Подгруппа отходов Waste subgroup	Наименование отходов Waste type	Кол-во, тыс. т/г Amount, thousand t/g	Рекомендуемые технологии обработки Recommended treatment technologies	Получаемый продукт Resulting product
СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОТХОДЫ НА ОРГАНИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ / ORGANIC CONSTRUCTION WASTE					
1	Древесные отходы Wood waste	Древесные материалы и конструкции, теплоизоляционные материалы на древесной основе, столярные изделия Wood-based materials and structures, heat insulation materials, joinery products	16...20	Рециклинг Recycling	Древесная щепа, наполнитель для композиционных материалов Wood chip, filler for composite materials
		Композиционные материалы на основе древесины (древесностружечные (ДСП) и древесно-волоконистые (ДВП) плиты, фанера, древесно-волоконистые плиты средней плотности (МДФ)) Wood-based composite materials (chipboard and fibreboard, plywood, medium density fibreboard (MDF))	8...12	Компостирование Composting	Рекультивационный материал Recultivation material
2	Бумажные и картонные отходы Paper and cardboard waste	Обои бумажные, бумага упаковочная, картонная тара Paper-base wallpaper, packing paper, cardboard containers	1,1...1,6	То же Same	То же Same
3	Отходы битумных материалов Bituminous materials waste	Асфальтобетон Asphalt concrete	720	Холодная регенерация, горячая регенерация на асфальтобетонных заводах (АБЗ) Cold regeneration, hot regeneration at asphalt concrete plants (AP)	Асфальтобетонные смеси Bitumen-concrete mixtures
		Битумные мастики, рулонные кровельные и гидроизоляционные материалы Bituminous pastes, roofing and waterproofing materials	240	Рекуперация Recovery	Битумные материалы Bituminous materials
4	Отходы пластмасс и полимеров Plastic and polymer waste	Отходы линолеума, полимерных плиток и погонажных изделий Linoleum, polymer tile and mouldings waste	0,42	Рециклинг, регенерация, утилизация в плазматронах Recycling, regeneration and disposal in plasmatrons	Синтез газ. Наполнитель для композиционных материалов, сырьевой материал термопластичных полимеров Synthesis gas. Composite materials filler, raw material for thermoplastic polymers
		Отходы пенопласта и поропласта Foam plastic and porous foam waste	0,19	Утилизация в плазматронах Disposal in plasma torches	

Продолжение табл. 1 / Continuation of Table 1

№ No.	Подгруппа отходов Waste subgroup	Наименование отходов Waste type	Кол-во, тыс. т/г Amount, thousand t/g	Рекомендуемые технологии обработки Recommended treatment technologies	Получаемый продукт Resulting product
		Пластмассовые трубы водоснабжения, канализации и электропроводки Plastic pipes for water supply, sewerage and electrical wiring	0,26	Рециклинг, регенерация Recycling, regeneration	
СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОТХОДЫ НА МИНЕРАЛЬНОЙ ОСНОВЕ / MINERAL CONSTRUCTION WASTE					
5	Отходы на основе природного камня Natural stone waste	Бой облицовочных плит Facing slab scrap	0,6	Рециклинг Recycling	Мелкий и крупный заполнитель для бетонов, наполнитель для производства сухих строительных смесей
		Отходы камнеобработки, в том числе шламовые Stone working waste, including sludge waste	0,05		Fine and coarse aggregate for concrete, filler for dry mortar production
		Бой брусчатки и бортовых камней Paving stone and curb stone waste	0,1		
6	Отходы на основе бетона и строительных растворов Concrete and mortar waste	Отходы железобетона Reinforced concrete waste	1300...1600		Крупный заполнитель для бетонов
		Бой бетона Concrete scrap	850... 1100		Coarse aggregate for concrete
		Отходы легких, в том числе ячеистых бетонов Lightweight concrete, including cellular concrete waste	75		Мелкий заполнитель для бетонов, наполнитель для сухих строительных смесей Fine aggregate for concrete, filler for dry mortars
		Сухие отходы штукатурных смесей Dry plaster waste	47		Наполнитель для сухих строительных смесей Filler for dry mortars
7	Отходы на основе минеральных вяжущих веществ Mineral binders waste	Отходы гипсовых материалов Gypsum waste	120... 150	Регенерация, в том числе в плазменных реакторах Regeneration including the one performed in plasma reactors	То же Same
		Бой силикатного кирпича и блоков Sand-lime brick scrap	220		Силикатные материалы, теплоизоляционные материалы волокнистой структуры Sand lime materials, heat insulation materials having fibrous structure

Продолжение табл. 1 / Continuation of Table 1

№ No.	Подгруппа отходов Waste subgroup	Наименование отходов Waste type	Кол-во, тыс. т/г Amount, thousand t/g	Рекомендуемые технологии обработки Recommended treatment technologies	Получаемый продукт Resulting product
		Отходы на основе извести (известково-песчаные, известково-шлаковые и известково-золяные материалы) Lime waste (calcareous- sandy, calcareous-slag and calcareous-ash materials)	15	Регенерация в плазменных реакторах, рециклинг Regeneration in plasma reactors, recycling	Наполнитель для сухих строительных смесей. Вторичные теплоизоляционные материалы волокни- стой структуры Filler for dry mortars. Recycled heat insulation materials having fibrous structure
8	Асбесто- цементные отходы/Хризотил-цементные отходы Asbestos- cement waste/ Chrysotile- cement waste	Кровельные материалы, облицовочные панели, вентиляционные короба и трубы Roofing materials, cladding panels, airboxes and ventilation pipes	3,6	Рециклинг Recycling	Активный наполнитель при производстве низ- комарочных вяжущих. Производство вяжущих веществ Reactive aggregate used in the production of low grade binders. Production of binders
9	Отходы на основе стекла Glass waste	Стеклобой / Scrap glass	2,4	Регенерация в плазменных реакторах Regeneration in plasma reactors	Вторичные теплоизо- ляционные матери- алы волокнистой структуры, вторичное пеностекло Recycled heat insulation materials having fibrous structure, recycled foam glass
		Отходы пеностекла Foam glass waste	0,1		
		Отходы минеральных воло- кон, в том числе от теплоизо- ляционных материалов Mineral fiber waste including heat insulation materials	1,3		
10	Отходы на основе керамических материалов Ceramic material waste	Бой керамического кирпича, плитки и керамзита Ceramic brick, tile and expanded clay aggregate scrap	340	Регенерация Regeneration	Отощачая добавка для производства кера- мического кирпича, за- полнитель для бетонов, дренажный материал Thinning agent for the production of ceramic bricks, filler for concrete, drain material

ОТХОДЫ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ / WATER-BASED WASTE

11	Отходы при сборе, обезвре- живании и ути- лизации при водоснабжении и водоотведе- нии Waste gener- ated as a result of collection, decontamination and recycling in the process of water supply and disposal	Осадки с песколовок и отстойников при механической очистке хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод Sediments of sand traps and those generated in the process of mechanical treatment of household and combined waste water	120	Биотермическая обработка совместно с органоминеральными отходами. Обезвоживание, слоевая минерализация, упрочнение Biothermal treatment performed together with organomineral waste. Dehydration, layered mineralization, hardening	Грунты биологической рекультивации, грунты технической рекультивации Biological recultivation soils, technical recultivation soils
----	--	---	-----	--	--

№ No.	Подгруппа отходов Waste subgroup	Наименование отходов Waste type	Кол-во, тыс. т/г Amount, thousand t/g	Рекомендуемые технологии обработки Recommended treatment technologies	Получаемый продукт Resulting product
		Ил избыточный биологический очистных сооружений в смеси с осадком механической очистки хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод Excessive biological silt of treatment plants mixed with the sludge generated in the process of mechanical treatment of household and combined waste water	930		
		Отходы при очистке сетей, колодцев дождевой (ливневой) канализации Wastes generated in the course of cleaning of networks, wells of the runoff (storm) sewerage system	15...40		

новном для получения вторичного щебня. Технология такой переработки заключается в измельчении конструкций, извлечении металлического каркаса арматуры и последующей сортировки полученного бетонного лома на фракции. Известно, что щебень, полученный из вторичного сырья сносимых бетонных построек, обходится значительно дешевле природного, так как расход энергии для его переработки почти в 10 раз меньше, а себестоимость бетона сокращается на 25 % [14]. Несмотря на очевидную выгоду использования такого материала, строительные организации неохотно применяют вторичный щебень и отдают предпочтение природным горным породам.

Как показывает мировая практика, переработанные бетонные конструкции применяются в качестве сырьевых компонентов при изготовлении тротуарной плитки, стеновых материалов, для возведения основания под дороги и фундаментные плиты, а также в качестве наполнителей для сухих строительных смесей [15]. Являясь инертными компонентами, в таких системах они могут легко заменять природный песок и тонкомолотые горные породы, что представляет собой дополнительную возможность для их рециклинга.

Среди некоторых биопозитивных технологий достаточно интересна разработка, основанная на применении плазменных реакторов различных конфигураций. Так, в работе [16] достаточно подробно изучен вопрос получения теплоизоляционного материала волокнистой структуры из золош-

лаковых отходов, образующихся при сжигании твердого топлива на ТЭЦ. В работе предложен способ получения расплава золошлаковых волокон с последующей вытяжкой расплава и кристаллизации в волокно. Описан процесс, при котором существует возможность организации одноэтапной выплавки путем нагрева сырья комбинированным способом. В результате начального электродугового плазменного нагрева и последующего расплавления сырьевого материала по мере проплавления образуется чаша токопроводящего расплава. В дальнейшем подсыпка сырья происходит в расплавленную алюмосиликатную массу, в которой протекает ток одновременно с процессами гомогенизации и электромагнитным перемешиванием. Для получения расплава массой до 150 кг/ч затрачивается мощность 1,1...1,3 кВт/кг. В итоге получается волокнистый материал, который обладает всеми технологическими и эксплуатационными свойствами, характерными для теплоизоляционных материалов строительного назначения. Данная технология хорошо подходит для переработки золошлаковых отходов, однако описание применения такого способа с использованием в качестве исходного сырья строительных отходов в литературе не найдено. Скорее всего, это связано с требованиями химической однородности сырьевых компонентов. Тем не менее эта технология является эффективной при переработке отходов минераловатных изделий базальтовой и силикатной природы, а также композиционных материалов на основе золошлаковых отходов, например

известково-шлаковых и известково-зольных силикатных кирпичей и блоков.

Иначе обстоят дела с отходами строительных материалов органической природы, к которым относятся кровельные и гидроизоляционные материалы (рубероид, битумные мастики, изол и др.), часть теплоизоляционных материалов (полистирол, пенополиуретан, вспененный полиэтилен и др.), декоративные (поливинилхлоридные (ПВХ) панели, линолеум, лакокрасочные покрытия и др.). Сжигание таких материалов или их пиролиз не позволяют комплексно решить эту проблему, что связано с выделением при термической утилизации многокомпонентных групп токсичных соединений, например диоксинов или фуранов. Помимо прочего, остается вопрос утилизации оставшихся после горения зол или шлаков, которые в виду своей токсичности не находят применения в строительстве [17, 18].

Такого рода отходы возможно утилизировать, также применяя плазменные технологии. Однако в процессе термодеструкции происходит выделение большого количества токсичных газов, что негативно сказывается на состоянии окружающей среды. При таком подходе можно предложить использовать комплексное решение с применением плазмотронов для обезвреживания побочно выделяемых газов. Установки такого типа работают по следующему принципу: вещества (в порошковом, пастообразном или жидком виде) подаются в дугу низкотемпературной плазмы, затем в реакторе при высоких температурах они разлагаются до молекулярного состояния с дальнейшим переходом в нетоксичный газ. Эффективность такого способа переработки может достигать 99,9 %, так как существует возможность регулировать процесс путем изменения параметров состава плазмообразующего газа, его давления и температуры. Такими методами можно обезвреживать органические, фтор-, хлор-, фосфор- и сероорганические вещества, металлоорганику и некоторые неорганические материалы [19, 20].

Еще одним отдельным классом для переработки являются битумосодержащие отходы, образующиеся при ремонте мягких кровель или при замене гидроизоляционных слоев. При капитальном ремонте мягких кровель старый гидроизоляционный ковер снимается с крыш зданий, а образующиеся отходы в большинстве своем складывают на полигонах. Как показали исследования, описанные в работе [21], возможна переработка таких материалов для получения битумонаполненного связующего, которое можно использовать в получении асфальто-бетонных смесей.

Известно, что битум кровельных покрытий под воздействием различных факторов эксплуатации значительно изменяет свою структуру, из-за чего дальнейшее его использование без специальной обработки практически невозможно. Такая обработка подразумевает введение пластифицирующих

и регенерирующих добавок органической структуры, которые восстанавливают эксплуатационные свойства битумов [22]. В конечном итоге предложена технология, позволяющая извлекать из отходов строительных гидроизоляционных материалов до 50 % вторичного битума. Полученный битум можно рекомендовать для использования при строительстве и ремонте дорожных покрытий.

Отдельную группу материалов составляют композиты, произведенные с применением в качестве связующего карбамидоформальдегидной смолы. К таким материалам относятся древесностружечные, древесноволокнистые плиты, фанеры, карбамидные пенопласты, стеклохолсты. Также эти смолы применяются для производства как теплоизоляционных материалов, так и специальных сортов бумаги и картона.

В качестве утилизации отходов на основе карбамидоформальдегидных смол в основном предусмотрен вывоз на полигоны или мусорные свалки¹, однако существует биопозитивная технология компостирования, которая позволяет безопасно и эффективно перерабатывать подобного рода материалы. Автором патента [23] предложена биопозитивная технология переработки таких материалов после потери ими эксплуатационных свойств, на выходе получается экологический материал, который также можно использовать в строительстве для рекультивационных мероприятий. Сущность технологии состоит в биоконверсии строительных отходов на основе карбамидоформальдегидной смолы с помощью микроорганизмов во время процесса компостирования. Содержащая в своем составе углерод и азот (по 25 % соответственно) карбамидоформальдегидная смола не только используется микроорганизмами почвенного слоя в качестве питательной среды, но и переходит при этом в доступные для питания растений формы элементов.

Предложенная технология компостирования позволяет получить насыщенный питательными веществами сыпучий и несслеживающийся продукт с нейтральной или слабо щелочной реакцией среды. Подобный компост можно применять в дорожном строительстве при озеленении прилегающих территорий, при устройстве растительного слоя откосов, для рекультивации земель полигонов отходов различного происхождения, а также в зеленом строительстве.

Обращение с отходами при водоснабжении и водоотведении также возможно с применением биопозитивных технологий. Например, в работе [24] описана технология утилизации шламовых

¹ Патент RU № 2505561. МПК C08J 11/04, C05C 9/02, C05F 17/00. Способ утилизации некондиционной полимеризованной карбамидоформальдегидной смолы с помощью компостирования / А.А. Брашайко : патенто-обл. А.А. Брашайко. Заяв. № 2011142413/05, 20.10.2011; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3.

отходов в грунтоподобные рекультивационно-строительные материалы. Идея заключается в последовательном применении технологии обезвреживания промышленных отходов (геоконтейнерное обезвреживание, штабельно-слоевая биодеструкция), повышении прочности полученных грунтоподобных материалов путем введения добавок, обладающих вяжущими и структурообразующими свойствами. Создание специализированных производств обработки шламовых отходов в грунтоподобные рекультивационно-строительные материалы способствует минимизации негативного воздействия на окружающую среду, сокращению объемов природных грунтов, а также снижению расходов, связанных с размещением отходов.

Еще одним примером биопозитивной технологии выступает усовершенствование компостирования пастообразных органоминеральных отходов (осадков городских сточных вод, агропромышленных отходов, отходов гидролизной и целлюлозно-бумажной промышленности) путем использования порообразующих добавок на основе горячих шламов [25]. Данное мероприятие позволяет сократить длительность фазы роста температур, вплоть до ее устранения.

Повышение температуры выше 100 °С не только существенно интенсифицирует процессы, но и делает биопозитивные технологии эффективными в зимний период при отрицательных температурах. Для того, чтобы не разогревать добавки специально, возможно применение в качестве порообразующих добавок отходов, повышенная температура которых является побочным эффектом основного технологического процесса: коры из отвальных буртов, шламлигнина гидролиза древесины, золы ТЭЦ и шлаков доменного производства, имеющих высокую температуру плавления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

К многотоннажным материалам органоминеральной природы относится и утративший свои эксплуатационные свойства асфальтобетонгранулят (АГБ), который образуется при фрезеровании верхних слоев покрытия автомобильных дорог. При переработке этого материала в качестве биопозитивной технологии можно рассмотреть холодную регенерацию. Суть технологии заключается в комплексной переработке асфальтобетонного гранулята путем его измельчения, введения дополнительного вяжущего с последующим распределением и уплотнением покрытия. В качестве вяжущего наиболее часто применяются битумные эмульсии или же неорганические гидравлические вяжущие. Полученные на их основе композиты будут отличаться не только своими расчетными характеристиками, но и скоростью формирования равновесной структуры. Известно, что в дорожных работах отдают

предпочтение органическим вяжущим материалам, а не минеральным, так как необходимо не только быстро формировать конструкцию дорожной одежды, но обеспечить у полученного конструктива проектный модуль упругости.

Асфальтобетонгранулят состоит из полиразмерных минеральных частиц заполнителя, который покрыт тонкими пленками битумного вяжущего, сформированного при первичном производстве асфальтобетонной смеси. При их горячей регенерации сфрезерованный материал нагревают в специальных установках, вводят некоторое количество битума или специальных добавок и получают асфальтобетонную смесь, которую возможно применять для верхних слоев покрытия автомобильных дорог. В связи с тем, что битум находится не в объемном, а в пленочном состоянии, он наиболее уязвим для термоокислительной деструкции. В таком случае низкомолекулярные фракции масел и смол будут утеряны из группового состава битума и его эксплуатационные свойства станут заведомо низкими.

Использовать потенциал остаточного битума без его высокотемпературной обработки возможно лишь с применением химически активных веществ. В качестве таких компонентов можно рассмотреть водно-органические эмульсии на основе толуола или керосина.

Полученные эмульсии по показателю объема дисперсной фазы являются концентрированными и склонны к седиментации. Вследствие высокой концентрации капли находятся в постоянном контакте, и легко наступает коалесценция с укрупнением капель, которая обусловлена действием сил межмолекулярного притяжения. Для увеличения устойчивости таких эмульсий в качестве эмульгатора использовали каучук, а его оптимальное содержание составляет 2 % от массы дисперсионной фазы.

Из данных в табл. 2 видно, что при увеличении концентрации дисперсионной фазы на каждые 10 % устойчивость эмульсий сокращается на 1...2 %, что связано с переходом от концентрированных систем к высококонцентрированным. Критическое время хранения эмульсии составляет 1440 мин, при этом расслоение находится на уровне не более 25 %. При выдерживании эмульсий более суток системы становятся стабильными к расслоению, при этом до составляющих распадается четверть компонентов.

Определение оптимального содержания активатора — важнейший этап проектирования состава АГБ. От количества активатора зависит долговечность АГБ в дорожной конструкции. Поэтому важно точно определить требуемое количество активатора, которое зависит от плотности минерального остова и размера минеральных частиц. Трудность определения количества активатора минерального материала расчетным методом заключается в том, что необходимы данные о величине поверхности и толщине пленки активатора на зернах. Если не-

Табл. 2. Седиментационная устойчивость полученных эмульсий в зависимости от состава**Table 2.** Sedimentation stability of resulting emulsions depending on composition

Время стабильности, мин Stability time, min	Соотношение компонентов эмульсии / Ratio of emulsion components					
	Керосин/вода / Kerosene/water			Толуол/вода / Toluene/water		
	2/3	1/1	3/2	2/3	1/1	3/2
60	1,2	1,2	1,3	1,1	0,9	1,2
90	2,1	2,2	2,2	1,7	1,3	1,9
120	3,8	3,9	4,1	3,4	3,6	3,4
300	6,1	6,4	6,4	5,2	5,0	5,3
720	11,6	12,7	13,9	10,1	10,7	11,3
1440	21,3	22,0	24,8	18,1	18,4	19,9
2880	22,3	22,6	25,1	18,9	18,9	20,7

Табл. 3. Основные свойства АГБ с разным содержанием активных компонентов в активаторах**Table 3.** Main properties of granulated asphalt concrete having different content of active components inside activators

Состав эмульсии Emulsion composition	Соотношение компонентов эмульсии Ratio of emulsion components	Показатели качества полученных композитов Quality factors of the obtained composites		
		Водонасыщение, % Water saturation, %	Набухание, % Swelling, %	Предел прочности на сжатие, МПа Ultimate compressive strength, MPa
Керосин/вода Kerosene/water	2/3	12,6	1,81	1,0
	1/1	15,8	5,92	0,14
	3/2	17,4	7,06	0,12
Толуол/вода Toluene/water	2/3	21,5	5,36	1,70
	1/1	23,4	6,21	1,21
	3/2	25,7	9,22	1,03

известны удельная поверхность минерального материала и толщина пленки на зернах, количество активатора определяют экспериментально, путем приготовления и испытания АГБ.

Для установления оптимального содержания количества эмульсии применялась методика определения максимальной плотности и оптимальной влажности грунта. Установлено, что достижение максимальной плотности в процессе структурообразования происходит при введении активатора в количестве 10 % по массе. Полученные стандартные образцы были испытаны на гидрофизические и физико-механические свойства.

Из данных табл. 3 очевидно, что увеличение количества керосина и толуола в составе активаторов приводит к снижению прочности и ухудшению эксплуатационных свойств в водонасыщенном состоянии, что объясняется изменением гранулята в момент структурообразования. Таким образом, установлено, что оптимальным соотношением активного компонента и воды является 2:3 мас. %. По-

следующее увеличение количества воды в активаторе приводит к перенасыщению композита влагой, потере устойчивости образцов и значительному снижению прочности.

Из результатов проведенных испытаний физико-механических свойств можно сделать вывод, что полученный в процессе регенерации композит обладает характеристиками, которые позволяют устраивать из него нижние слои покрытий автомобильных дорог, а данную технологию возможно называть биопозитивной.

ВЫВОДЫ

Современная строительная отрасль производит большое количество отходов, которые формируются на разных этапах жизненного цикла здания или сооружения. Если способы биопозитивной переработки отходов, образующихся при производстве строительных материалов, исследованы и внедрены достаточно широко, то отходы строительного секто-

ра после демонтажа зданий и конструкций практически им не подвержены. Состояние окружающей среды, новые требования к экологической безопасности и реализация Национального проекта «Экология» активно способствуют ускоренному переходу на биопозитивные технологии.

Существует множество биопозитивных технологий переработки отходов коммунально-строительного сектора, однако эффективность каждой технологии актуальна лишь для отдельных групп перерабатываемых материалов. Технологии, применение которых рационально при переработке органических материалов, будут малоэффективны или даже бесполезны при обращении с минеральными материалами и наоборот.

Биопозитивные технологии позволяют минимизировать нагрузку на окружающую среду, создавая тем самым более позитивное влияние, освобождая территории полигонов от захороненных отходов, уменьшая выброс токсичных веществ в атмосферу и вредных компонентов в грунтовые воды. Выбор технологии переработки напрямую зависит от множества факторов: это и химическая природа материала, и содержание в отходах извлекаемых полезных компонентов, и стадия разложения отходов. Ряд освещенных в работе технологий является, с экономической точки зрения, более ресурсозатратным, что препятствует их активному применению при переработке и утилизации отходов строительных материалов, тем не менее их роль в условиях существующей экологической обстановки весьма велика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тетиор А.Н. Устойчивое развитие: Устойчивое проектирование и строительство. М. : НИИ-Природа, 1998. 310 с.
2. Сидорова В.В., Сорокина Н.А. Биопозитивные технологии, как основа развития устойчивой городской среды // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 10 (62). С. 27–40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biopozitivnye-tehnologii-kak-osnova-razvitiya-ustoychivoy-gorodskoy-sredy>
3. Wuni Ibrahim Y., Shen Geoffrey Q.P., Osei-Kyei R. Scientometric review of global research trends on green buildings in construction Journals from 1992 to 2018 // Energy and buildings. 2019. Vol. 190. Pp. 69–85. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.02.010
4. Nie Jianguo, Wang Jiaji, Gou Shuangke, Zhu Yaoyu, Fan Jiansheng. Technological development and engineering applications of novel steel-concrete composite structures // Frontiers of structural and civil engineering. 2019. Vol. 13. No. 1. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s11709-019-0514-x
5. Gunhan Suat. Analyzing sustainable building construction project delivery practices: builders' perspective // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2019. Vol. 24. No. 1. Pp. 89–102. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000397
6. Geng Yang, Ji Wenjie, Wang Zhe, Lin Borong, Zhu Yingxin. A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction // Energy and Buildings. 2018. Vol. 183. Pp. 500–514. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.017
7. Mohamed Ahmad F.H., Jamal M.H., Mohd Sam A.R. Green technology and sustainable urban drainage systems using eco-composite porous concrete: A preliminary study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 220. P. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/220/1/012039
8. Jiang Shaohua, Wang Na, Wu Jing. Combining BIM and ontology to facilitate intelligent green building evaluation // Journal of Computing in Civil Engineering. 2018. Vol. 32. No. 5. Pp. 63–79. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000786
9. Jang Woosik, Lee Sang Ku, Han Seung Heon. Sustainable performance index for assessing the green technologies in urban infrastructure projects // Journal of Management in Engineering. 2018. Vol. 34. No. 2. Pp. 41–68. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000582
10. Vishwakarma V., Ramachandran D. Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives — a review // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 162. Pp. 96–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174
11. Kasharin D.V. Using biopositive constructions made of composite materials in water and electricity supply for recreational facilities // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076275
12. Чижиков И.А. Применение биопозитивных конструкций и технологии при строительстве грунтовых сооружений в сложных гидрогеологических условиях // Интернет-журнал Науковедение. 2012. Вып. 4 (13). Ст. 107. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/2vn412.pdf>
13. Кудряшова Т.В., Баланина А.А., Свеженцева М.А. Проблемы утилизации строительных отходов и перспективы их решения // Актуальные проблемы и перспективы социально-экономического развития современной России : сб. ст. Всеросс. науч.-практ. конф. Великий Новгород, 24 марта 2017 г. / под ред. А.А. Пиковского. Великий Новгород, 2017. С. 57–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32692755>

14. Олейник П.П., Олейник С.П. Основные проблемы переработки строительных отходов // Жилищное строительство. 2005. № 5. С. 24–26.
15. Буянтуев С.Л., Кондратенко А.С. Исследование физико-механических свойств минеральных волокон, полученных с помощью электромагнитного технологического реактора // Вестник Восточно-Сибирского государственного технологического университета. 2013. № 5 (44). С. 123–129. URL: http://vestnik.esstu.ru/arhives/Physical_and_chemical_properties.pdf
16. Одинцов А.Н. О целесообразности применения метода плазменной утилизации отходов // Вісник СевНТУ. 2011. Вып. 119. С. 154–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846006>
17. Губанов Л.Н., Зверева В.И., Зверева А.Ю. Переработка, утилизация и рациональное использование строительных отходов // Приволжский научный журнал. 2013. Вып. 2 (26). С. 94–98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19119359>
18. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. О методах плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов // Аграрный вестник Урала. 2017. № 7 (161). С. 46–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30039744>
19. Пыкин Ю.А., Анахов С.В. Перспективы использования электроплазменных процессов в реше-

- нии технологических и экологических задач // Башкирский экологический вестник. 2013. № 2. С. 36–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25679929>
20. Асадуллина З.У., Исмагилов С.А., Яковлев В.В. Техничко-экономические и экологические преимущества природоохранной технологии // Башкирский химический журнал. 2012. № 2. С. 74–77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18281650>
21. Яковлев В.В., Кутыин Ю.А., Урманов Д.Р., Фархутдинова К.И. Органические вяжущие из битумосодержащих отходов ремонта кровельных покрытий // Проблемы строительного комплекса России : мат. XII Междунар. науч.-техн. конф. Уфа : УГНТУ, 2008. С. 50–52.
22. Махлай В.Н., Афанасьев С.В. Химия и технология карбамидоформальдегидного концентрата : монография. Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2007. С. 233.
23. Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н. Геоэкологическая оценка накопителей шламов водного хозяйства и разработка технологий их ликвидации // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 100–129. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.110-129
24. Чертес К.Л., Стрелков А.К., Смородин А.П. Интенсификация биотермической обработки осадков сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 1991. № 4. С. 36–38

Поступила в редакцию 10 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 25 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Львович Чертес** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической технологии и промышленной экологии, член-корреспондент РАЕН; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

Николай Игоревич Шестаков — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2893-7386, Scopus: 57205023447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Tetior A.N. *Sustainable development: sustainable design and construction*. Moscow, NIA-Priroda, 1998; 310. (rus.).
2. Sidorova V.V., Sorokina N.A. Technology as a basis for the development of a sustainable urban environment. *Construction and industrial safety*. 2018; 10(62):27-40. (rus.).
3. Wuni Ibrahim Y., Shen Geoffrey Q.P., Osei-Kyei Robert. Scientometric review of global research trends on green buildings in construction Journals from 1992 to 2018. *Energy and buildings*. 2019; 190:69-85. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.02.010
4. Nie Jianguo, Wang Jiaji, Gou Shuangke, Zhu Yaoyu, Fan Jiansheng. Technological development and engineering applications of novel steel-concrete composite structures. *Frontiers of structural and civil engineering*. 2019; 13(1):1-14. DOI: 10.1007/s11709-019-0514-x
5. Gunhan Suat. Analyzing sustainable building construction project delivery practices: builders' perspective. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2019; 24(1):89-102. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000397
6. Geng Yang, Ji Wenjie, Wang Zhe, Lin Borong, Zhu Yingxin. A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction. *Energy and Buildings*. 2018; 183:500-514. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.11.017

7. Mohamed Ahmad F.H., Jamal M.H., Mohd Sam A.R. Green technology and sustainable urban drainage systems using eco-composite porous concrete: A preliminary study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 220:012039. DOI: 10.1088/1755-1315/220/1/012039

8. Jiang Shaohua, Wang Na, Wu Jing. Combining BIM and ontology to facilitate intelligent green building evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2018; 32(5):63-79. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000786

9. Jang Woosik, Lee Sang Ku, Han Seung Heon. Sustainable performance index for assessing the green technologies in urban infrastructure projects. *Journal of Management in Engineering*. 2018; 34(2):41-68. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000582

10. Vishwakarma V., Ramachandran D. Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives — a review. *Construction and Building Materials*. 2018; 162:96-103. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174

11. Kasharin D.V. Using biopositive constructions made of composite materials in water and electricity supply for recreational facilities. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076275

12. Chizhikov I.A. Using biopositive constructions and processes in construction of soil structures under complex hydrogeological conditions. *Online magazine Naukovedenie*. 2012; 4(13):1-6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/2vn412.pdf> (rus.).

13. Kudryashova T.V., Balanina A.A., Svezhentseva M.A. Problems of utilization of building wastes and prospects of their solution. *Actual problems and prospects of socio-economic development of modern Russia : Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Veliky Novgorod, March 24, 2017*. Veliky Novgorod, 2017; 57-61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32692755> (rus.).

14. Oleinik P.P., Oleinik S.P. The main problems of construction waste recycling. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2005; 5:24-26. (rus.).

15. Buyantuev S.L., Kondratenko A.S. Physical and chemical properties of mineral fibres obtained by

electromagnetic process reactor. *ESSUTM Bulletin*. 2013; 5(44):123-129. URL: http://vestnik.esstu.ru/arhives/Physical_and_chemical_properties.pdf (rus.).

16. Odintsov A.N. About the expediency of applying the method of plasmic utilization of wastes. *News of SevNTU*. 2011; 119:154-157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846006> (rus.).

17. Gubanov L.N., Zvereva V.I., Zvereva A.Yu. Processing, utilization and rational use of construction waste. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2013; 2(26): 94-98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19119359> (rus.).

18. Anakhov S.V., Pykin Yu.A. On methods of plasma incineration in waste recycling and decontamination technologies. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017; 7(161):46-51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30039744> (rus.).

19. Pykin Yu.A., Anakhov S.V. Prospects electroplasma processes in decision technological and environmental concerns. *Bashkir Ecological Bulletin*. 2013; 2:36-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25679929> (rus.).

20. Asadullina Z.U., Ismagilov S.A., Yakovlev V.V. Techno-economic and ecological benefits of environmental protection technology. *Bashkir chemistry journal*. 2012; 2:74-77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18281650> (rus.).

21. Yakovlev V.V., Kutin Yu.A., Urmanov D.R., Farkhutdinova K.I. Organic binders from bitumen-containing wastes of roofing repair. *Problems of the building complex of Russia : materials of the XII International Scientific and Technical Conference*. Ufa, USTU, 2008; 50-52. (rus.).

22. Makhlai V.N., Afanasyev S.V. *Chemistry and technology of urea-formaldehyde concentrate : monograph*. Samara, SSC RAS publ., 2007; 233. (rus.).

23. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Pystin V.N. Geocological evaluation of water industry sludge ponds and developing the techniques of their disposal. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 2:100-129. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.110-129 (rus.).

24. Chertes K.L., Strelkov A.K., Smorodin A.P. Intensification of biothermal treatment of sewage sludge. *Water supply and sanitary equipment*. 1991; 4:36-38. (rus.).

Received December 10, 2019.

Adopted in a revised form on February 25, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: **Konstantin L. Chertes** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of chemical technology and industrial ecology, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RISC: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

Nikolay I. Shestakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of building materials and materials science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2893-7386, Scopus: 57205023447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru.

Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации

Ю.М. Косиченко, О.А. Баев

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации; г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются различные причины снижения гидравлической эффективности оросительных каналов гидромелиоративных систем, среди которых выделяются основные факторы: зарастание, заиливание и деформация русел. Приводятся данные по изменению в процессе эксплуатации коэффициентов шероховатости русел и КПД магистральных и распределительных каналов Юга России.

Материалы и методы. Гидравлической эффективностью гидромелиоративных систем будем называть обеспечение их высокой пропускной способности, близкой к проектной, при минимальных потерях. На основании анализа опыта эксплуатации оросительных каналов и ранее проведенных исследований сформулированы критерии их гидравлической эффективности по пропускной способности, коэффициенту полезного действия, допускаемым скоростям течения и допускаемым потерям воды на фильтрацию.

Результаты. Установлены показатели снижения пропускной способности и КПД при эксплуатации каналов с нормальным их состоянием, а также приведены соответствующие зависимости для определения остальных показателей гидравлической эффективности. По результатам анализа фактических данных, КПД магистральных каналов в земляном русле составляет 0,790, а для каналов в облицовке — 0,870, что значительно ниже требований норм. На основании компьютерной обработки натурных данных коэффициентов шероховатости и КПД каналов при нормальном их состоянии получены эмпирические зависимости вида $n = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$. Для сравнения приведены натурные данные изменения пропускной способности оросительных каналов в облицовке и в земляном русле при значительном их зарастании (растительностью и водорослями). Влияние этих факторов показано на примерах фотоиллюстраций и на основе полученных данных коэффициентов шероховатости, которые изменяются по сравнению с проектными значениями в 2–4 раза.

Выводы. Сравнение коэффициентов шероховатости по 15 каналам и участкам при сильном зарастании с проектными данными свидетельствует о том, что для каналов в земляном русле их шероховатость возрастает в 2,5–4,0 раза, а для каналов в облицовке — 1,7–2,5 раза. Проведенное сравнение результатов расчета коэффициентов шероховатости заросших русел по теоретическим формулам с натурными данными показало достаточно близкое их совпадение на примере трех каналов (Нижне-Донского и Азовского магистральных каналов, распределителя Бг-Р-7).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коэффициент шероховатости, оросительный канал, гидравлическая эффективность, пропускная способность, коэффициент полезного действия, гидравлическое сопротивление, земляное русло

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Косиченко Ю.М., Баев О.А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162

Hydraulic efficiency of irrigation channels in the course of operation

Yurij M. Kosichenko, Oleg A. Baev

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems; Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The co-authors have analyzed different reasons for the reduction of the hydraulic efficiency of irrigation channels comprising hydro-technical reclamation systems. The main factors include plant invasion, siltation and deformation of beds. The co-authors provide data describing changes in the values of bed roughness ratios and efficiency of main and distributary channels in the process of operation in the south of Russia.

Materials and methods. The hydraulic efficiency of irrigation and drainage systems will be called the provision of their high throughput, close to the design, with minimal losses. They are based on throughput capacity and efficiency values, acceptable flow rates and water losses due to the process of filtration. The criteria have been developed in furtherance of the analysis of operation of irrigation channels and previous studies.

Results. Factors reducing throughput capacity and channel efficiency have been identified for normal operating conditions; dependences needed to identify other hydraulic efficiency factors are also provided. Based on the analysis of actual data, the efficiency of main canals in the earthen bed is 0,790, and for canals in the cladding — 0,870, which is significantly lower than the requirements of the norms. Computer assisted processing of the field data on roughness and channel efficiency ratios, obtained under normal conditions, was performed to obtain empirical dependences $n = f(Q)$ and $\eta = f(Q)$. The field data describing changes in the throughput capacity of linings and earth beds of irrigation channels exposed to significant plant invasions (vegetation and algae) are provided for comparison purposes. The influence of these factors is demonstrated in the photos and proven by the values of roughness ratios that are two to four times different from the design ones.

Conclusions. Comparison of the roughness coefficients for 15 canals and sections with strong overgrowth with the design data indicates that for canals in the earthen channel their roughness increases by 2.5...4.0 times, and for canals in the lining — 1.7...2.5 times. Weedy bed roughness ratios were obtained by applying theoretical formulas and the field data, their comparison has demonstrated close convergence in respect of three channels, including Nizhne-Donskoy and Azovsky main channels, as well as distributary channel Bg-R-7.

KEYWORDS: roughness ratio, irrigation channel, hydraulic efficiency, throughput capacity, efficiency, hydraulic resistance, earth bed

FOR CITATION: Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Hydraulic efficiency of irrigation channels in the course of operation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1147-1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Обобщающие исследования гидравлической эффективности каналов представлены в работах В.С. Алтунина [1], И.А. Долгушева [2], В.Т. Чоу [3].

В работах Ю.М. Косиченко и др. [4–6] предложены критерии гидравлической эффективности каналов. Вопросами изучения и расчета заросших русел каналов занимались И.А. Долгушев [2], Э.Л. Беновицкий, М.Г. Хубларян [7] и др. [8]. Среди зарубежных авторов наиболее известны работы В.Т. Чоу [3], а также исследования, приведенные в источниках [9–13].

Как известно [4, 5], на нормальную работу каналов большое влияние оказывают такие факторы, как зарастание, заиливание и деформация русел каналов.

При зарастании каналов растительностью их пропускная способность может снизиться в 3–4 раза и более, скорость — в 2–3 раза, а коэффициент шероховатости может увеличиться в 3 раза. Влияние зарастания особенно сильно сказывается в южных районах, где вода в каналах хорошо прогревается. В случаях, когда скорость потока незначительная, зарастание русла канала растительностью происходит достаточно быстро, в течение нескольких дней. Каналы периодического действия часто зарастают по всему периметру, а при их постоянной работе и относительно высокой средней скорости течения они практически не зарастают.

Зарастание русел каналов растительностью значительно повышает коэффициент шероховатости, снижает скорости воды, пропускную способность русла. По данным исследований И.А. Долгушева [2], при сильном зарастании русла каналов коэффициенты шероховатости достигают значений 0,060...0,087.

Для обеспечения работоспособного состояния оросительных каналов необходимо добиться стабильной их пропускной и транспортирующей способности. Стабильность работы оросительных каналов зависит от многих факторов: деформаций русла, размывов, фильтрации, зарастания, заиливания, оползания откосов, разрушения облицовок, разрушения швов облицовок, образования трещин в бетоне и др.

К числу наиболее значимых причин, снижающих гидравлическую эффективность каналов как

в земляном русле, так и в облицовке, относятся фильтрация из земляного русла и водопроницаемость облицовок и их швов, которые приводят к различным негативным последствиям: непроизводительным потерям воды, подъему уровня грунтовых вод, подтоплению и заболачиванию территорий, засолению почв, созданию аварийных ситуаций. Следствием фильтрации из каналов является снижение КПД, необходимость строительства дренажа и отвода дренажного стока.

Комплексным показателем гидравлической эффективности каналов является их КПД, который учитывает потери при транспортировании и потери на фильтрацию из каналов.

Под гидравлической эффективностью каналов следует понимать обеспечение высокой пропускной способности их русел в процессе эксплуатации, близкой к проектной, при минимальных непроизводительных потерях воды, не превышающих допускаемые значения [4].

Н. Дэскэлеску [14] предлагал показатель гидравлической эффективности канала η_c выразить суммой двух параметров: η_t — параметра эффективности транспорта, характеризующего состояние содержания и проницаемость канала, и η_n — параметра распределения и использования воды:

$$\eta_c = \eta_t + \eta_n. \quad (1)$$

Согласно А.М. Латышенкову [15], под гидравлической эффективностью канала понимается коэффициент, представляющий собой отношение средней скорости движения воды v к скорости в канале с гидравлически наивыгоднейшим сечением $v_{г.н.}$:

$$A_v = v / v_{г.н.} = 0,97... 0,98. \quad (2)$$

Р.Р. Чугаев [16] ввел понятие практически наивыгоднейшей величины $\beta_{г.н.}^0$, которая лежит в пределах:

$$\beta_{г.н.} \leq \beta_{г.н.}^0 \leq (\beta_{г.н.})_{пред}, \quad (3)$$

где $\beta_{г.н.}$ — относительная ширина канала по дну для гидравлически наивыгоднейшего сечения.

Предельное значение гидравлически наивыгоднейшего сечения определяют по формуле, полученной Р.Р. Чугаевым:

$$(\beta_{г.н})_{пред} = 2,5 + \frac{m}{2}, \quad (4)$$

где m — коэффициент заложения откоса канала трапециевидного сечения.

На основе моделирования водных потоков с высшей водной растительностью (ВВР) методами гидромеханики сплошной среды авторами [8] сформулирована математическая модель, в которой предлагается учитывать обобщенный критерий P , представляющий собой суммарное сопротивление набегающему потоку. При этом зависимость коэффициента гидравлической шероховатости заросшего русла от свойств водной растительности может иметь следующий вид:

$$n_p = f(P, l/d), \quad (5)$$

где l — среднее расстояние между стеблями растений; d — характерный диаметр растений.

Как показал анализ авторов данной работы, коэффициент шероховатости (n_p) увеличивается с увеличением параметра P при всех значениях отношения l/d , характеризующего плотность растений на единицу площади.

Э.Л. Беновицкий [7], используя гидравлический подход к выводу уравнения равновесия основных действующих сил на выделенный отсек жидкости, получил расчетную формулу коэффициента шероховатости русла с частичным зарастанием.

Ю.М. Косиченко [17] рассматривал более общую схему с учетом береговой растительности и водорослей, а также с учетом случайного характера их распределения по закону Пуассона, которая приведена в разделе «Результаты».

Из зарубежных ученых следует отметить книгу В.Т. Чоу [3], которая посвящена гидравлике открытых каналов, в том числе проблеме зарастания русел каналов и естественных водотоков. Здесь автор впервые представил детальную таблицу коэффициентов шероховатости как незаросших, так и заросших русел.

В работе [9] рассматривается прогнозирование средней скорости потока в открытых каналах с затопленной растительностью; в [10] изучается обтекание гибкого растительного покрова и дается оценка аналитических моделей; в [11] представлена оценка гидравлического сопротивления на последующее развитие профиля глубин водной поверхности в наклонном канале, покрытом густой растительностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ряде статей [9–11] большое внимание уделяется исследованиям гидравлических сопротивлений двухслойной растительности при ее различной плотности. Данные исследования проводились экспериментально на лабораторных моделях, где растительность моделировалась в виде пластиковых цилиндров круглого сечения или теоретически —

на основе новых аналитических моделей. Нижний слой растительности у дна канала испытывал максимальное сопротивление из-за густой растительности, а верхний слой создавал меньшее сопротивление движению потока. Турбулентные потоки через растительность характеризуются рядом вихревых структур: вихревые потоки кармана в нижних слоях с растительностью, вихри около вершины растительности и вихри значительно выше растительного слоя. Предложенная новая аналитическая модель основана на принципах усреднения Рейнольдса. Данная модель была откалибрована с использованием экспериментов. Всего было проанализировано 22 типа различных экспериментальных условий с различной плотностью, жесткостью и глубиной потока.

В других исследованиях рассматривалось применение наноматериалов для снижения коэффициентов шероховатости открытых каналов. Изучались такие наноматериалы, как наноксиды кремния, алюминия и титана. В работе показано, что динамика воды в малых ирригационных каналах требует своего тщательного исследования для повышения точности измерений расхода в этих каналах. В связи с этим разрабатываются новые датчики потока, которые бы обеспечивали повышенную точность измерений.

Сравнительные исследования различных типов облицовки каналов, в том числе из новых геосинтетических материалов, представлены с целью определения наиболее экономичного материала. Для облицовки каналов использовались геосинтетические материалы из поливинилхлорида (ПВХ), бетон, кирпичная кладка и др. На основании исследований самым экономичным материалом, подходящим для облицовки каналов, был признан геосинтетический материал.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа данных, предоставленных службами эксплуатации учреждений мелиорации Минсельхоза России, были определены средние значения КПД магистральных и распределительных каналов Юга России (рис. 1). Общее среднее значение КПД магистральных каналов в земляном русле и облицовке (рис. 2, а) составляет 0,829, что значительно меньше требований норм свода правил СП 100.13330.2016¹ (СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения). При этом КПД каналов в земляном русле составляет 0,790, а для каналов в облицовке средний КПД равен 0,870, что также ниже требуемых значений. Еще более низкие зна-

¹ Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016: утвержден Министерством строительства жилищ.-ком. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16 : введ. в действие с 17.06.17. М. : Изд-во стандартов, 2017. 209 с.

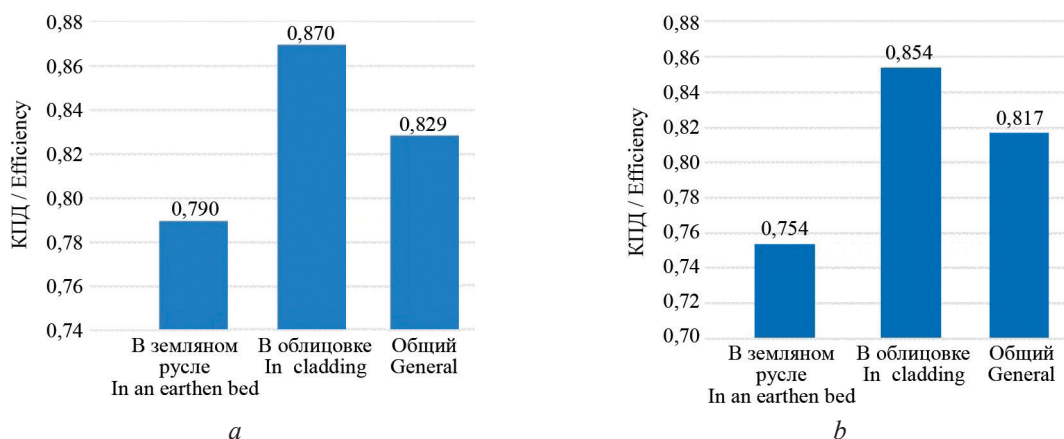


Рис. 1. Коэффициент полезного действия каналов оросительных систем Юга России: *a* — магистральных каналов; *b* — распределительных каналов

Fig. 1. Irrigation system channels efficiency of the south of Russia: *a* — main channels; *b* — distributing channels

чения КПД имеют распределительные каналы оросительных систем. Общий средний КПД для них составляет 0,817, а для каналов в земляном русле КПД равен 0,754, для каналов в облицовке — 0,854. Согласно требованиям норм СП 100.13330.2016, КПД магистральных каналов должен быть не менее 0,90, а КПД распределительных каналов — не менее 0,93.

В результате анализа ряда работ и опыта эксплуатации оросительных каналов сформулированы критерии их гидравлической эффективности [5]:

1) по пропускной способности:

$$\alpha'_{\text{ср}} Q_{\text{пр}} \leq Q \leq Q_{\text{пр}}; \quad (6)$$

2) по допускаемым скоростям:

$$v_{\text{нез}} < v \leq v_{\text{пер}}; \quad (7)$$

3) по относительной ширине русла:

$$\beta_{\text{г.н}} < \beta \leq \beta_{\text{max}}; \quad (8)$$

4) по коэффициенту полезного действия:

$$\beta'_{\text{ср}} \eta_{\text{пр}} < \eta \leq \eta_{\text{пр}}. \quad (9)$$

В дополнение к критериям (6–9) авторами статьи сформулирован критерий по допускаемым потерям на фильтрацию:

$$Q_{\text{ф.мин}} \leq Q_{\text{ф}} \leq Q_{\text{ф.доп}}. \quad (10)$$

В вышеприведенных зависимостях использованы следующие обозначения: $Q_{\text{пр}}$ — проектная (расчетная) и пропускная способность канала при эксплуатации (по данным замеров); $\alpha'_{\text{ср}}$ — средний показатель снижения пропускной способности канала вследствие влияния неучтенных факторов (незначительных деформаций русла, малой степени зарастания и др.) при нормальном состоянии русла; $v_{\text{пер}}$, $v_{\text{нез}}$, v — допускаемые неразрывающая, незаилающая и средняя скорости при эксплуатации (по данным замеров); $\beta_{\text{г.н}}$, β_{max} , β — относительные

значения ширины канала по дну гидравлически наивыгоднейшего сечения (минимальная, максимальная и эксплуатационная, соответственно) (по данным замеров); $\eta_{\text{пр}}$, η — проектный и эксплуатационный КПД (по данным замеров); $\beta'_{\text{ср}}$ — средний показатель снижения КПД вследствие влияния неучтенных факторов (незначительных деформаций русла, малой степени зарастания и др.) при нормальном состоянии русла; $Q_{\text{ф.мин}}$, $Q_{\text{ф.доп}}$, $Q_{\text{ф}}$ — удельные фильтрационные потери на 1 м минимальные, допускаемые и эксплуатационные (по данным замеров).

Для определения показателя снижения пропускной способности оросительных каналов α' при наличии данных наблюдений за расходами используем их отношение: $\alpha' = Q/Q_{\text{пр}}$ (где Q — замеренный эксплуатационный расход в канале при нормальном уровне воды; $Q_{\text{пр}}$ — проектный расход).

В случае неизвестного эксплуатационного расхода Q показатель α' можно рассчитать приближенно по коэффициентам шероховатости русел каналов, используя формулы при равномерном движении потока:

$$\alpha' = \frac{Q}{Q_{\text{пр}}} = \frac{w C \sqrt{Ri}}{w_{\text{пр}} C_{\text{пр}} \sqrt{R_{\text{пр}} i_{\text{пр}}}}. \quad (11)$$

Откуда, принимая допущение о том, что при нормальном состоянии канала такие параметры, как площадь живого сечения w , гидравлический радиус R и уклон дна i , будут близки к проектным, после сокращений получим приближенную зависимость с учетом выражения для коэффициента Шези

по Н.Н. Павловскому [16] $C = \frac{1}{n} R^y$:

$$\alpha' \approx \frac{n_{\text{пр}}}{n}, \quad (12)$$

где $n_{\text{пр}}$, n — коэффициенты шероховатости русла канала при эксплуатации и проектный, соответственно.

Показатель снижения КПД каналов β' найдем из соотношения:

$$\beta' \approx \frac{\eta}{\eta_{\text{пр}}}. \quad (13)$$

Параметры $\beta_{\text{г.н}}$ и β_{max} получаем по известным зависимостям для гидравлически наивыгоднейшего сечения и максимального по А.М. Латышенкову [15]:

$$\beta_{\text{г.н}} = \frac{b}{h} = 2(\sqrt{1-m^2} - m); \quad (14)$$

$$\beta_{\text{max}} = \frac{\beta_{\text{г.н}} + m}{A_h^2 A_v} - m, \quad (15)$$

где b — ширина канала по дну; h — глубина канала при нормальном уровне; m — коэффициент заложения откоса; A_h и A_v — параметры глубины и скорости течения, вычисляемые по зависимостям:

$$A_h = \frac{h}{h_{\text{г.т}}}; \quad A_v = \frac{v}{v_{\text{г.т}}}. \quad (16)$$

При проведении расчетов следует задаваться значением параметра A_v в пределах 0,97...0,98.

Значения допускающей незаилающей скорости определяются по формулам в соответствии с СП 100.13330.2016¹:

$$v_{\text{нез}} = 0,3R^{0,25} \quad (17)$$

или

$$v_{\text{нез}} = A Q^{0,2}, \quad (18)$$

где A — эмпирический коэффициент, принимаемый $A = 0,33...0,55$ при $\bar{w} < 1,5$ мм/с — $A = 0,33$; $\bar{w} = 1,5...3,5$ мм/с — $A = 0,44$; $\bar{w} > 3,5$ мм/с — $A = 0,55$.

Значения допускающей неразрывающей скорости находим в соответствии с СП 100.13330.2016¹.

Допускаемые и минимальные потери на фильтрацию $Q_{\text{ф.доп}}$, $Q_{\text{ф.мин}}$ получаем исходя из следующих соображений. Они могут определяться по нормативному КПД оросительных каналов по СП 100.13330.2016¹ (для магистральных — $\eta_{\text{нор}} \geq 0,90$, для распределительных — $\eta_{\text{нор}} \geq 0,93$).

Используем зависимость для КПД канала в виде:

$$\eta = \frac{Q - Q_{\text{n}}}{Q} = 1 - \frac{Q_{\text{n}}}{Q}, \quad (19)$$

где $Q_{\text{n}} = Q_{\text{ф}} + Q_{\text{и}}$ — технические потери из канала, включающие потери на фильтрацию $Q_{\text{ф}}$ и испарение $Q_{\text{и}}$.

Найдем зависимости допускаемых потерь на фильтрацию с учетом задания потерь на испарение ориентировочно равными:

$$Q_{\text{n}} = (0,01/0,02)Q \approx 0,015Q. \quad (20)$$

Подставляя в (21) $\eta_{\text{нор}}$ и Q_{n} , получим:

$$0,90 \geq 1 - \frac{Q_{\text{ф}} - 0,015Q}{Q}, \quad (21)$$

откуда после преобразований:

$$Q_{\text{ф}} + 0,015Q \leq 0,10Q,$$

или

$$Q_{\text{ф}} \leq 0,10Q - 0,015Q.$$

Тогда зависимость для определения допускаемых фильтрационных потерь в магистральных каналах будет:

$$Q_{\text{ф.доп}} \leq 0,085Q. \quad (22)$$

Аналогично для распределительных каналов допускаемые фильтрационные потери найдем по зависимости:

$$Q_{\text{ф.доп}} \leq 0,055Q. \quad (23)$$

Полученные зависимости (24) и (25) основываются на нормативных требованиях к каналам и учитывают главную эксплуатационную характеристику — расход канала Q .

Для вывода зависимости минимальных удельных потерь на фильтрацию необходимо учесть, какой КПД каналов можно обеспечить с использованием тех или иных современных высокоэффективных противофильтрационных материалов и конструкций облицовок. Опыт применения таких конструктивных решений, накопленный в ФГБНУ «РосНИИПМ» [6], показывает, что при использовании геомембран из полиэтилена толщиной от 1 до 3 мм и бентоматов можно добиться КПД до 0,97...0,98.

Подставляя предельные значения КПД в уравнение (23), запишем его в виде:

$$\eta_{\text{max}} = 0,97...0,98 \leq 1 - \frac{Q_{\text{ф}} - 0,015Q}{Q}. \quad (24)$$

Заменяя в (24) КПД на среднее значение $\eta_{\text{max}} = 0,975$, после преобразований получим зависимость для определения нижнего предела минимальных фильтрационных потерь:

$$Q_{\text{ф.мин}} \geq 0,030Q. \quad (25)$$

Для обеспечения высокой гидравлической эффективности каналов, как было указано выше, необходимо применение конструкции облицовок из геосинтетических и геокомпозитных материалов. Использованию высокоэффективных материалов в настоящее время посвящено много работ как отечественных [6], так и зарубежных авторов [18–22].

К геосинтетическим материалам относятся геомембраны из полиэтилена высокого (ПЭВД) и низкого (ПЭНД) давления поливинилхлорида (ПВХ) [6], а к геокомпозитным — комбинированные материалы, которые включают несколько типов геосинтетиков, соединенных между собой иглопробивным способом или термоскреплением, таких как бентонитовые маты, геомембраны гладкие, соединенные с геотекстилями, дренажные маты и многие другие композиты, исследования которых рассмотрены в работах [23–28].

Для определения показателя снижения пропускной способности оросительных каналов α' используем сгруппированные данные натурных исследований пропускной способности каналов Юга России при нормальном их состоянии (табл. 1).

На основании статистической обработки полного ряда натурных данных коэффициентов шероховатости девяти каналов и участков Юга России, включающего 21 значение наблюдений, было установлено, что среднестатистическое значение показателя снижения пропускной способности при нормальном состоянии русла составило:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum \alpha' i}{k} = \frac{20,132}{21} = 0,958,$$

где k — общее количество ряда наблюдений (21 значение).

Доверительный интервал измерения показателя α' :

$$\bar{\alpha}' \pm t_{\alpha,k} \sigma_{\bar{\alpha}'} = 0,958 \pm 2,08 \cdot 0,00452 = 0,938...0,977,$$

где $t_{\alpha,k}$ — распределение Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $k = 21$, $\bar{\alpha}' = 0,958$; $\sigma_{\bar{\alpha}'}$ — ошибка выборочной средней ($\sigma_{\bar{\alpha}'} = 0,00452$ м³/с).

Таким образом, в результате статистической обработки полного ряда наблюдений коэффициентов n получено среднее значение коэффициента шероховатости:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i}{\sum k_i} = \frac{0,4784}{21} = 0,0228.$$

Тогда доверительный интервал изменения коэффициента n составит:

$$n_{\text{ср}} \pm t_{\alpha,k} \sigma_{n_{\text{ср}}} = 0,0228 \pm 2,08 \cdot 0,00105 = 0,0206...0,0250.$$

На рис. 2 представлена точечная диаграмма изменения коэффициентов шероховатости в зависимости от расходов для полного ряда наблюдений при нормальном состоянии для каналов в земляном русле.

Проведя компьютерную обработку данных коэффициентов n с использованием линии тренда и показателя достоверности аппроксимации R^2 и исключения выпадающих значений n , были получены следующие эмпирические формулы:

• степенная:

$$n = 0,0256Q^{-0,024} (R^2 = 0,895);$$

• полиномиальная:

$$n = 2 \cdot 10^{-9} Q^2 - 8 \cdot 10^{-6} Q + 0,023 (R^2 = 0,836).$$

Теперь рассмотрим данные по 10 каналам — изменения КПД в зависимости от расхода Q , которые приведены в табл. 2. Полный ряд наблюдений включает в себя 17 каналов и значений КПД.

Среднестатистическое значение для полного ряда показателей снижения КПД получено равным:

$$\bar{\beta}' = \frac{\sum \beta'}{\sum k} = \frac{15,858}{17} = 0,932.$$

Доверительный интервал изменения показателя снижения КПД:

$$\bar{\beta}' \pm t_{\alpha,k} \sigma_{\bar{\beta}'} = 0,932 \pm 2,11 \cdot 0,0121 = 0,907...0,958.$$

Компьютерная обработка данных наблюдений с учетом исключения выпадающих значений

Табл. 1. Сгруппированные натурные данные пропускной способности, коэффициентов шероховатости и показателя α'
Table 1. Grouped full-scale data of throughput, roughness coefficients, and indicator α'

Канал Channel	Q , м ³ /с / Q , м ³ /s	n	$n_{\text{нр}} / n_{\text{th}}$	$\alpha' = \frac{n_{\text{нр}}}{n} / \alpha' = \frac{n_{\text{th}}}{n}$
БСК-1 (1...7 км) BSK-1 (Great Stavropol Canal) (1...7 км)	25,84...189,19	0,0238...0,0225	0,0225	0,945...1,0
БСК-1 (7...16 км) BSK-1 (Great Stavropol Canal) (7...16 км)	25,01...186,15	0,0238...0,0226	0,0225	0,945...0,995
БСК-1 (16...27 км) BSK-1 (Great Stavropol Canal) (16...27 км)	23,84...182,17	0,0239...0,0227	0,0225	0,941...0,991
БСК-1 (1...27 км) BSK-1 (Great Stavropol Canal) (1...27 км)	25,23...182,60	0,0234...0,0226	0,0225	0,961...0,995
Невинномысский МК / Nevinnomyssk Main Channel	30,0...75,0	0,0215...0,0225	0,0225	0,930...1,0
Баксан-Малка / Baksan-Malka	10,0...27,0	0,0225...0,0210	0,0200	0,952...0,930
Донской МК / Don Main Channel	201,0	0,0268	0,0250	0,933
Пролетарский МК / Proletarskii Main Channel	54,0	0,0203	0,0200	0,985
Терско-Кумский МК / Tersko-Kumskii Main Channel	80,0	0,0237	0,0225	0,949

позволила получить следующие эмпирические зависимости:

- степенную:

$$\eta = 0,638Q^{0,0501} \quad (R^2 = 0,805);$$

- линейную:

$$\eta = 0,006Q + 0,789 \quad (R^2 = 0,751);$$

- полиномиальную:

$$\eta = -6 \cdot 10^{-6} Q^2 + 0,002Q + 0,711 \quad (R^2 = 0,812).$$

Среднее значение КПД каналов в земляном русле составило:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum \eta}{\sum k} = \frac{13,698}{17} = 0,806.$$

Отсюда, проведенный статистический анализ натуральных данных снижения пропускной способности и КПД каналов в земляном русле при нормальном их техническом состоянии позволяет сделать вывод, что при эксплуатации неизбежно происходит снижение основных проектных показателей расхода $Q_{\text{пр}}$ и КПД $\eta_{\text{пр}}$ до определенных значений. Так, в случае нормального состояния оросительных каналов по данным изменения коэффициентов шероховатости

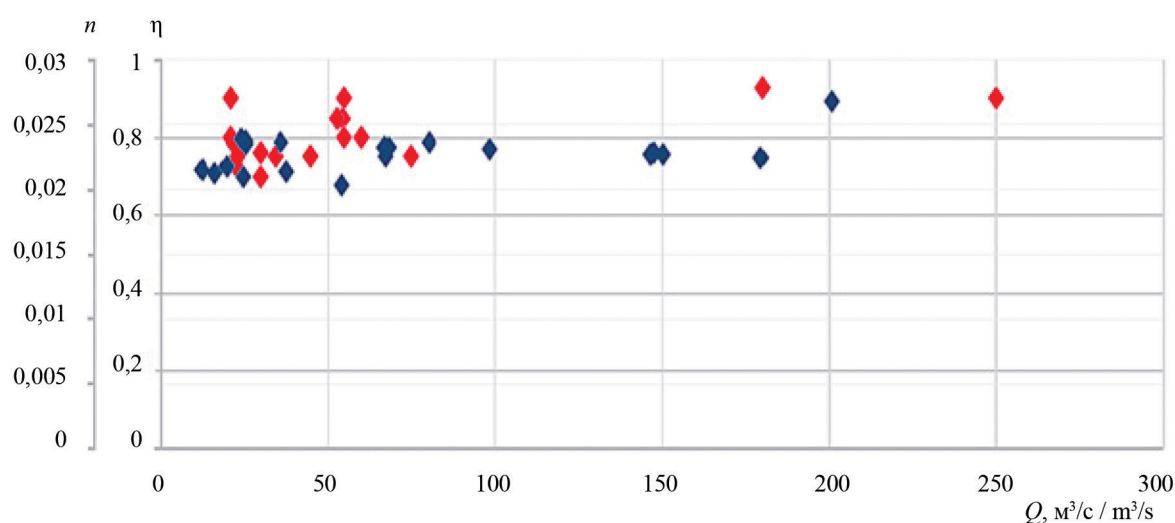


Рис. 2. Зависимость характеристик каналов в земляном русле от расходов при нормальном состоянии: красный — коэффициент полезного действия (данные каналов: БСК-1; БСК-2, Александровский распределитель (Р-1), Саблинский распределитель (Р-1), БСК-3, БСК-4, Правоегорлыкский МК, Невинномысский, Азовский МК, Багаевский МК); синий — коэффициент шероховатости (данные каналов БСК-1 (1...7 км), (16...27 км), (1...27 км); Баксан-Малка, Невинномысский, Донской МК, Пролетарский МК, Терско-Кумский)

Fig. 2. Dependence of the channel characteristics in the earth bed on the flow under normal conditions: red — efficiency factor (BSK-1; BSK-2, Aleksandrovskii distributor (R-I data), Sablinskii distributor (R-I), BSK-3, BSK-4, Pravoegorlykskii Main Channel, Nevinnomyssk Main Channel, Azov Main Channel, Bagaevskii Main Channel); blue — roughness coefficient (BSK-1 (1...7 km), (16...27 km), (1...27 km); Baksan-Malka, Nevinnomyssk, Don Main Channel, Proletarskii Main Channel, Tersko-Kumskii)

Табл. 2. Натурные данные КПД каналов в земляном русле и показателя снижения их КПД

Table 2. Full-scale data on the efficiency of the channels in the earth bed and their efficiency reduction indicators

Канал / Channel	$Q, \text{ м}^3/\text{с} / Q, \text{ м}^3/\text{с}$	η	$\eta_{\text{пр}} / \eta_{\text{th}}$	$\alpha' = \frac{\eta_{\text{пр}}}{\eta} / \alpha' = \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta}$
БСК-1 / BSK-1	180	0,928	0,90	1,031
БСК-2 / BSK-2	60	0,8	0,85	0,941
Александровский распределитель / Aleksandrovskii distributor	21	0,90	0,85	1,058
Саблинский распределитель / Sablinskii distributor	21	0,80	0,85	0,941
БСК-3 / BSK-3	55	0,80	0,85	0,941
БСК-4 / BSK-4	53	0,85	0,90	0,944
Право-Егорлыкский МК / Pravo-Egorlykskii Main Channel	45	0,75	0,85	0,882
Невинномысский / Nevinnomyssk	75	0,90	0,93	0,967
Азовский МК / Azov Main Channel	22	0,78	0,83	0,939
Багаевский МК / Bagaevskii Main Channel	34,6	0,75	0,84	0,906

сти (см. табл. 2) доверительный интервал показателя снижения пропускной способности составил $\alpha' = 0,938...0,977$, а по данным КПД (см. табл. 2) показатель снижения КПД — $\beta' = 0,907...0,958$. На основании этих данных можно полагать, что при эксплуатации происходит снижение пропускаемого расхода по каналу при нормальном его состоянии на 2,3...6,2 %, а КПД — на 4,2...9,3 %. Учитывая, что такое снижение основных показателей гидравлической эффективности достаточно большого количества каналов обосновано данными натурных наблюдений, предлагается их принять за допускаемые значения по отношению к проектным значениям, расходам и КПД каналов. Так как эти показатели характеризуют условия эксплуатации каналов,

то они могут быть названы как эксплуатационные и, соответственно, обозначены через $Q_{\text{экс}}$ и $\eta_{\text{экс}}$.

Указанные основные показатели гидравлической эффективности каналов при эксплуатации могут быть определены по соотношениям:

$$Q_{\text{экс}} = Q_{\text{пр}} - (0,023...0,062)Q_{\text{пр}} = (0,938...0,977)Q_{\text{пр}};$$

$$\eta_{\text{экс}} = \eta_{\text{пр}} - (0,042...0,093)\eta_{\text{пр}} = (0,907...0,958)\eta_{\text{пр}}.$$

В связи с этим считаем целесообразным включить данные положения в качестве дополнения к нормативному документу СП 100.13330.2016¹.

Для сравнения далее рассмотрим имеющиеся натурные данные по коэффициентам шероховатости каналов в облицовке и в земляном русле при наличии в них водорослей и значительного зарастания растительностью (табл. 3).

Табл. 3. Натурные данные пропускной способности каналов и показателя снижения пропускной способности при наличии водорослей и зарастания

Table 3. Full-scale data on channel throughput capacity and indicators of throughput capacity reduction in the presence of algae and overgrowth

Канал Channel	$Q, \text{м}^3/\text{с} / Q, \text{м}^3/\text{с}$	$n_{\text{зр}} / n_{\text{ов}}$	$n_{\text{пр}} / n_{\text{th}}$	$\alpha'_{\text{зр}} = \frac{n_{\text{пр}}}{n} / \alpha'_{\text{ов}} = \frac{n_{\text{th}}}{n}$
Каналы в облицовке / Lined channels				
Распределительный канал Бг-Р-7 / Distributing channel Bg-R-7	2,59	0,0354	0,0157	0,443
ПК 56 / PK 56	1,13	0,0369	0,0157	0,425
ПК 189 / PK 189	17,0	0,0290	0,0170	0,586
Северский Донец-Донбасс / Severskiy Donets-Donbass	17,0	0,0300	0,0170	0,566
б. Ср. Ступки / b. Sr. Stupki	11,0	0,0335	0,0170	0,507
б. Долгая / b. Dolgaia	5,3	0,0330	0,0150	0,454
Канал ТМ-1 / TM-1 channel	3,7	0,0330	0,0150	0,454
гидропост 1 / gauging station 1	14,2	0,0250	0,0150	0,600
Канал ТМ-2 / TM-2 channel	8,4	0,0310	0,0150	0,484
гидропост 1 / gauging station 1	12,0	0,0270	0,0150	0,550
гидропост 2 / gauging station 2	7,8	0,0320	0,0150	0,469
Каналы в земляном русле / Earth bed channels				
Нижне-Донской МК / Nizhne-Donskoy Main Channel	25,6	0,0374	0,0225	0,601
	22,5	0,038	0,0225	0,592
	21	0,042	0,0225	0,535
	17,7	0,045	0,0225	0,500
	10,3	0,0603	0,0225	0,373
	7,6	0,0532	0,0225	0,422
Азовский МК / Azov Main Channel	5,3	0,0504	0,0225	0,446
	15	0,0554	0,0225	0,406
	12,8	0,0482	0,0225	0,466
	9,8	0,063	0,0225	0,357
	7,1	0,0623	0,0225	0,361
	4,1	0,056	0,0225	0,401
Солдатский МК / Soldatskii Main Channel	2,5	0,067	0,0225	0,335
	1,45	0,033	0,0225	0,681
	1,65	0,03	0,0225	0,750
	1,3	0,046	0,0225	0,489
	0,3	0,087	0,0225	0,258
	33	0,043	0,02	0,465
Канал Северский Донец – Донбасс Severskiy Donets-Donbass Channel	33	0,046	0,02	0,435
	28	0,084	0,02	0,238
	30	0,052	0,02	0,385
	30	0,052	0,02	0,385

Средние значения коэффициентов шероховатости каналов в облицовке составляют:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i}{\sum k_i} = \frac{0,3458}{11} = 0,0314,$$

а каналов в земляном русле:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i}{\sum k_i} = \frac{1,099}{21} = 0,0523.$$

Среднестатистические значения показателей снижения пропускной способности:

- для каналов в облицовке:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum \alpha'_i}{\sum k_i} = \frac{5,543}{11} = 0,504;$$

- для каналов в земляном русле:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum \alpha'_i}{\sum k_i} = \frac{9,496}{21} = 0,452.$$

Анализ значений коэффициентов шероховатости каналов в облицовке (см. табл. 3) по сравнению с проектными значениями показывает, что при сильном зарастании коэффициенты $n_{\text{зар}}$ существенно возрастают (в 1,7–2,5 раза) за счет сопротивления, которое оказывают водоросли. Еще большая степень зарастания, которая приводит к увеличению коэффициентов шероховатости до 2,5–4,0 раз, характерна для каналов в земляном русле. При этом показатели снижения пропускной способности α' уменьшаются для каналов в облицовке до 0,425...0,450 против данных α' кана-

лов без зарастания (с нормальным состоянием) (см. табл. 1) — до 0,930...0,945.

На рис. 3 приведены точечные диаграммы коэффициентов шероховатости каналов в облицовке и в земляном русле при зарастании. В результате математической обработки этих данных на компьютере в программе Microsoft Excel получены степенные зависимости:

- для каналов в облицовке при образовании водорослей:

$$n_{\text{обл}} = 0,0374Q^{-0,077} \quad (R^2 = 0,82);$$

- для каналов в земляном русле при значительном зарастании растительностью (камышом):

$$n_{\text{зем}} = 0,074Q^{-0,16} \quad (R^2 = 0,783).$$

Таким образом, натурные данные в табл. 3 свидетельствуют о том, что при зарастании растительностью каналов в земляном русле и при наличии водорослей в каналах с облицовкой гидравлическая эффективность их значительно снижается, что приводит к снижению пропускной способности в 2–4 раза.

Для сравнения приведены фотоиллюстрации каналов без зарастания в нормальном состоянии (рис. 4) и с зарастанием (рис. 5).

Фотографии каналов Ростовской области (см. рис. 5) — Нижне-Донского МК и Азовского МК — дают наглядное представление о степени влияния растительности (камыш) и водорослей (сине-зеленых) на живое сечение каналов и сопротивление движению водного потока.

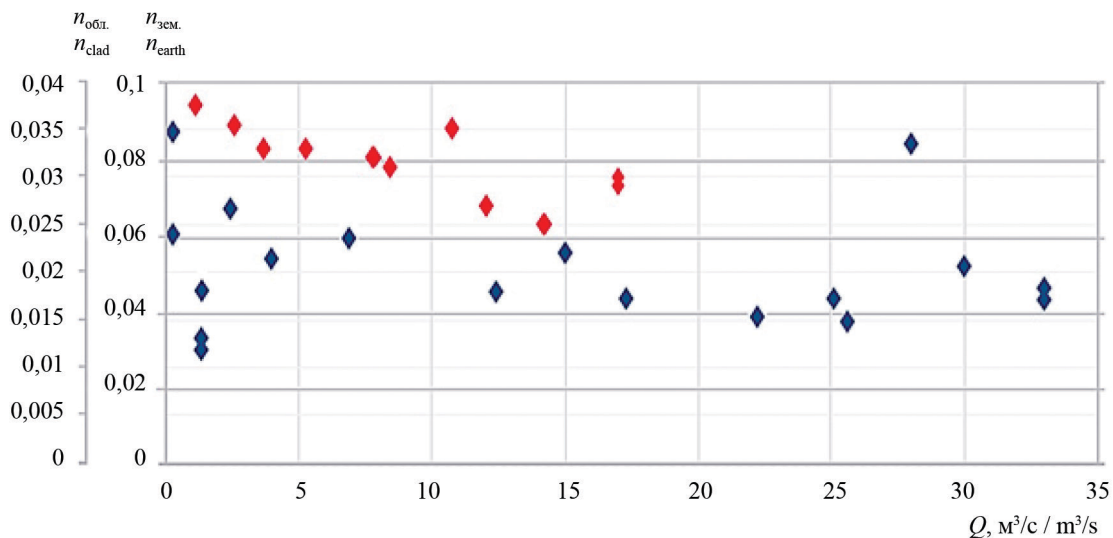


Рис. 3. Зависимость коэффициентов шероховатости n каналов от расходов Q при сильном зарастании русел: синий — для каналов в облицовке (данные каналов: Бг-Р-7, Сев. Донец – Донбасс, ТМ 1, ТМ 2 г/п 1, г/п 2); красный — для каналов в земляном русле (данные каналов: Нижне-Донской МК, Азовский МК, Солдатский МК, Сев. Донец – Донбасс)

Fig. 3. Dependence of channel roughness coefficients n on flows Q when the beds are heavily overgrown: blue — for lined channels (data of Bg-R-7 channels, Sev. Donets-Donbass, TM 1, TM 2 gauging station 1, gauging station 2); red — for earth bed channels (channels data: Nizhne-Donskoy Main Channel, Azov Main Channel, Soldatskii Main Channel, Sev. Donets-Donbass)



Рис. 4. Оросительные каналы Юга России в нормальном состоянии: *a* — Донской МК, 46 км; *b* — Большой Ставропольский канал (БСК-1), 6 км

Fig. 4. Irrigation channels of the south of Russia under normal conditions: *a* — Don Main Channel, 46 km; *b* — Great Stavropol Canal (BSK-1), 6 km



Рис. 5. Оросительные каналы Ростовской области при сильном их зарастании: *a* — Нижне-Донской МК; *b* — Азовский МК

Fig. 5. Irrigation channels of Rostov Region with strong overgrowth: *a* — Nizhne-Donskoy MK; *b* — Azov MK

В связи с этим важной задачей для борьбы с зарастанием каналов является удаление растительности с помощью специальных косилок и обработка ложа гербицидами.

Аналогичные данные по влиянию степени зарастания растительностью каналов на снижение гидравлической эффективности каналов приводятся в работах И.А. Долгушева [2] и В.Т. Чоу [3]. При этом, согласно результатам исследований, максимальные значения коэффициентов шероховатости земляных русел достигают значений 0,060...0,087 при средних значениях 0,035...0,045. Весьма обстоятельные исследования различных каналов за рубежом представлены в работах [3, 18–20], где приведены фотоиллюстрации типичных каналов с различной степенью зарастания при коэффициентах шероховатости русла от 0,012...0,024 (в нормальном состоянии без зарастания) до 0,08...0,15 (при очень высокой степени зарастания водорослями, кустарниками и небольшими деревьями). В работе [3] приведена разработанная авторами детальная таблица значений коэффициентов шероховатости каналов, вклю-

чающая данные при зарастании русел растительностью, водорослями и кустарником, вследствие чего значения коэффициентов шероховатости достигают до 0,05...0,14.

Далее рассмотрим гидравлические расчеты заросших русел каналов для определения коэффициентов шероховатости и оценки их гидравлической эффективности.

Используя вышеприведенную теоретическую формулу коэффициентов шероховатости заросших русел для условий зарастания водной растительностью и водорослями, найдем расчетные значения n_p для каналов Нижне-Донского МК, Азовского МК, распределителя Бг-Р-7 и сравним их с натурными данными.

Расчетная схема для наиболее общего случая при частичном зарастании русла канала водной растительностью приведена на рис. 6. Исходя из этой общей схемы, Ю.М. Косиченко [17] получена обобщающая зависимость с учетом береговой растительности и водорослей при случайном характере их распределения:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{\chi_0 \left(\frac{v_0}{v}\right)^2}{\chi} + \frac{\chi_p \left(\frac{v_p}{v}\right)^2}{\chi} + \frac{\chi_{\text{вод}} \left(\frac{v_{\text{вод}}}{v}\right)^2}{\chi} + \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \left[C_d d \frac{\omega_p}{\omega} \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 \left(N + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right) \right]} + \square \rightarrow$$

$$\square + k \frac{\lambda'_p h_p}{4 \omega} \left(\frac{v_0}{v}\right)^2 + \frac{\lambda'_{\text{вод}} \omega_{\text{вод}}}{4 \omega} \left(\frac{v_0}{v}\right)^2 \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m},$$

где n_0 — коэффициент шероховатости заросшего русла без растительности; χ_0 — часть смоченного периметра русла без растительности, м; χ — общий периметр сечения русла с учетом части периметра без растительности и с растительностью, м; v_0 — средняя скорость потока части русла без растительности, м/с; v — средняя скорость всего сечения потока с учетом незаросшей и заросшей части русла, м/с; v_p — средняя скорость потока в пределах зоны растительности, м/с; $\chi_{\text{вод}}$ — периметр границ зоны водорослей, м; $v_{\text{вод}}$ — средняя скорость потока в пределах зоны водорослей, м/с; R — гидравлический радиус, м; g — ускорение силы тяжести, м/с²; C_d — коэффициент лобового сопротивления растений; d — диаметр растений, м; ω_p — площадь сечения русла с растительностью; ω — площадь сечения русла без растительности; N — густота растительности, шт./м²; σ_N — среднеквадратичное отклонение растений; v_0 — интенсивность (густота) зон растений; P_N, P_1 — вероятность распределения соответственно зон растений и зон водорослей; k — число границ раздела растительности; λ'_p — коэффициент гидравлического сопротивления русла по границе зоны с растительностью; h_p — высота смоченной части растений, м; $\omega_{\text{вод}}$ — площадь зоны водорослей, м; $\lambda'_{\text{вод}}$ — коэффициент гидравлического сопротивления зон водорослей; v_1 — густота зон водорослей; m — количество интервалов зон водорослей.

Из более общей формулы (26) можно получить частные зависимости.

Формула для расчета при частичном зарастании русла водной растительностью (камышом) с двух берегов канала на откосах при исключении слагаемых под корнем, относящихся к участкам с водорослями, будет:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{\chi_0 \left(\frac{v_0}{v}\right)^2}{\chi} + \frac{\chi_p \left(\frac{v_p}{v}\right)^2}{\chi} + \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \left[C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 \left(\bar{N} + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_p}{P_N}} \right) \right]^2 + k \frac{\lambda'_p h_p}{4 \omega} \left(\frac{v_0}{v}\right)},$$

а в случае наличия только водорослей без водной растительности с учетом преобразований получим:

$$n = \frac{n_0}{\omega_0 / \omega} \cdot \sqrt{1 + \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \cdot \frac{\lambda'_b}{4} \cdot \frac{\omega_b}{\omega} \cdot \ln \frac{(\bar{v}_b \cdot \omega_b)^{m_b}}{P_b m_b}}.$$

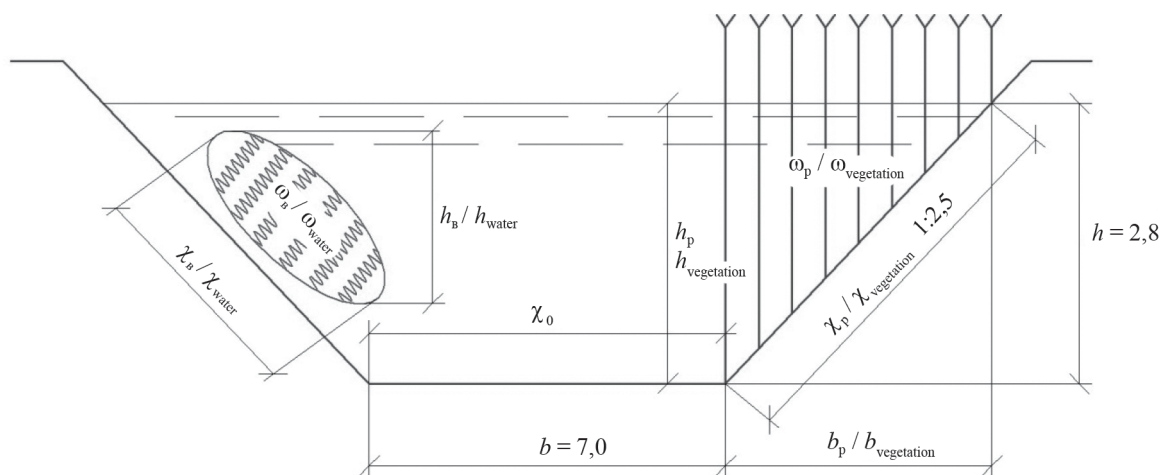


Рис. 6. Расчетная схема канала при зарастании водной растительностью и водорослями (на примере Нижне-Донского МК, размеры в м)

Fig. 6. Design diagram of channel with aquatic vegetation and algae overgrowth (by the example of the Nizhne-Donskoy Main Channel, dimensions in m)

При расчете коэффициента шероховатости заросшего русла для конкретных случаев учитываются соответствующие расчетные формулы (26)–(28) и рассматриваются необходимые натурные данные.

Нижне-Донской МК. Расчет для условий его зарастания на откосе с одного берега водной растительностью (камышом), а с другого берега — водорослями при незаросшем дне канала проводим по формуле (26).

Исходные данные: $Q = 6,4 \text{ м}^3/\text{с}$; $n = n_{\text{пр}} = 0,0225$; $n_{\text{нат}} = 0,0374$; $h = 2,8 \text{ м}$; $b = 7,0 \text{ м}$; $R = 1,45 \text{ м}$; $C_d = 0,5$; $\bar{N} = 10 \text{ шт./м}^2$; $\omega = 43,12 \text{ м}^2$; $h_p = \frac{1}{2}h = 1,4 \text{ м}$;

$\omega_0 = 19,6 \text{ м}^2$; $\omega_p = 9,8 \text{ м}^2$; $\omega_b = 6,0 \text{ м}^2$; $v = 0,148 \text{ м/с}$; $v_0 = 0,32 \text{ м/с}$; $v_p = 0,065 \text{ м/с}$; $v_b = 0,053 \text{ м/с}$; $\chi = 29,77 \text{ м}$; $\chi_0 = 12,6 \text{ м}$; $\chi_b = 8,79 \text{ м}$; $\chi_p = 8,16 \text{ м}$; $v_0/v = 2,16$; $v_p/v = 0,439$; $v_b/v = 0,358$; $\chi_0/\chi = 0,423$; $\chi_p/\chi = 0,274$; $\chi_b/\chi = 0,294$; $\omega_p/\omega = 0,227$; $h_p/\omega = 0,032$; $\omega_b/\omega = 0,139$; $\bar{v}_p = 5 \text{ шт./м}$; $P_p = 0,9$; $\sigma_N = 0,3$; $\bar{v}_b = 1 \text{ шт./м}$; $P_b = 0,85$; $\lambda'_p = 0,28$; $\lambda'_b = 0,256$; $k = 1$, $m_b = 0,1$.

Азовский МК (65 км). Расчет для условий его частичного зарастания водной растительностью (камышом) при незаросшем дне проводим по формуле (27).

Исходные данные: $Q = 2,07 \text{ м}^3/\text{с}$; $n_0 = n_{\text{пр}} = 0,0225$; $n_{\text{нат}} = 0,0554$; $h = 1,6 \text{ м}$; $b = 4,5 \text{ м}$; $R = 1,04 \text{ м}$;

$C_d = 0,5$; $\bar{N} = 55 \text{ шт./м}^2$; $\omega = 13,6 \text{ м}^2$; $\chi = 13,11 \text{ м}$; $h_p = 1,6 \text{ м}$; $\omega_0 = 7,2 \text{ м}^2$; $\omega_p = 6,4 \text{ м}^2$; $v = 0,152 \text{ м/с}$; $v_0 = 0,230 \text{ м/с}$; $v_p = 0,065 \text{ м/с}$; $\chi_0 = 4,5 \text{ м}$; $\chi_p = 14,62 \text{ м}$; $v_0/v = 1,51$; $v_p/v = 0,427$; $\omega_p/\omega = 0,471$; $h_p/\omega = 0,059$; $\bar{v}_p = 5 \text{ шт./м}$; $P_p = 0,9$; $\sigma_N = 0,3$; $\lambda'_p = 0,28$; $\lambda'_b = 0,256$; $k = 2$.

Распределитель Бг-Р-7 (ПК-189). Расчет для условий его зарастания водорослями (сине-зелеными) проводим по формуле (28).

Исходные данные: $Q = 1,13 \text{ м}^3/\text{с}$; $n_0 = n_{\text{пр}} = 0,0157$; $n_{\text{нат}} = 0,0369$; $\omega = 5,6 \text{ м}^2$; $R = 0,76 \text{ м}$; $\omega_b = 1,12 \text{ м}^2$; $\lambda'_b = 0,354$.

Все результаты расчета коэффициентов шероховатости заросших русел Нижне-Донского МК, Азовского МК и распределительного канала Бг-Р-7 сведены в табл. 4.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что для всех случаев расчетные значения коэффициентов шероховатости заросших русел удовлетворительно согласуются с натурными данными в пределах от 11 до 18 %. Так, для Нижне-Донского МК расчетный коэффициент шероховатости при среднем количестве камыша на 1 м^2 $\bar{N} = 10 \text{ шт./м}^2$ составил $n_{\text{расч}} = 0,0442$, а отклонение от натурального значения — $\varepsilon = 15,4 \%$. Для Азовского МК расчетное значение коэффициента полу-

Табл. 4. Результаты расчета коэффициентов шероховатости заросших русел каналов по теоретическим формулам и сравнения с натурными данными

Table 4. Calculation data of roughness coefficients of overgrown channel beds using theoretical formulas and comparison with full-scale data

Канал, тип русла Channel, bed type	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$ $Q, \text{ м}^3/\text{s}$	$n_{\text{нат}}/n_0$ $n_{\text{исч}}/n_0$	v/v_0	$\omega, \text{ м}^2$ $\omega, \text{ м}^2$	$R, \text{ м}$ $R, \text{ м}$	$\bar{N}, \text{ шт./м}^2$ $\bar{N}, \text{ pcs./m}^2$	$n_{\text{расч}}$ $n_{\text{дес}}$	$\varepsilon, \%$	Характер зарастания русла Bed overgrowth type
Нижне-Донской МК, земляное русло Nizhne-Donskoy Main Channel, earth bed	6,4	$\frac{0,0374}{0,0225}$	$\frac{0,148}{0,320}$	43,12	1,45	10	0,0442	15,4	Зарастание с одного берега камышом, с другого — водорослями Club-rush overgrowth on one bank and algae on the other bank
Азовский МК (65 км), земляное русло Azov Main Channel (65 km), earth bed	2,07	$\frac{0,0554}{0,0225}$	$\frac{0,152}{0,230}$	3,60	1,04	55	0,0452	–18,4	Зарастание обоих берегов Both banks overgrowth
Распределительный канал Багаевской ОС Бг-Р-7 (ПК-189), русло, облицованное бетоном Distributing channel of Bagaevskaia Irrigation System Bg-R-7 (PK-189), concrete bed	1,13	$\frac{0,0369}{0,0157}$	0,20	5,60	0,76	5*	0,0416	11,3	Водоросли по всему сечению русла Algae across the entire bed cross-section

Примечание: *Зоны водорослей в русле

Note: *Algae zones in the bed

чилось наибольшим $n_{\text{расч}} = 0,0452$ при отклонении от натурального значения $\varepsilon = -18,4 \%$, что объясняется очень сильным зарастанием русла с обоих берегов на откосах. Для канала Бг-Р-7 расчетный коэффициент наименьший — $n_{\text{расч}} = 0,0416$ при отклонении от натурального значения $\varepsilon = 11,3 \%$. Такой результат, по-видимому, можно объяснить меньшей степенью зарастания облицованных каналов водорослями.

Таким образом, выполненное сравнение подтверждает справедливость применения теоретических формул для расчета заросших русел каналов.

В заключение отметим, что на гидравлическую эффективность каналов влияют не только деформации их русел, зарастание растительностью, но и фильтрация из каналов в грунтовое основание. При этом, если фильтрация в грунтовое основание каналов хорошо изучена, то фильтрация (водопроницаемость) через трещины и швы облицовки еще требует своего изучения.

Исходя из вышеприведенных примеров влияния зарастания на коэффициенты шероховатости русел каналов, можно считать, что проведенные исследования гидравлической эффективности каналов Юга России согласуются и подтверждаются результатами исследований [2, 4].

ВЫВОДЫ

1. Анализ ранее проведенных исследований и опыта эксплуатации оросительных каналов Юга России свидетельствует о том, что в процессе функционирования происходит снижение их гидравлической эффективности вследствие влияния различных факторов, к числу основных из которых относятся зарастание, заиливание и деформации русел каналов.

2. Как показала проведенная статистическая обработка натурных данных коэффициентов шероховатости и коэффициентов полезного действия по 9–17 каналам Юга России, при нормальном их состоянии среднее их значение для каналов в земляном русле составит $n_{\text{ср}} = 0,0228$ и $\eta_{\text{ср}} = 0,806$. При этом средний показатель снижения пропускной способности $\bar{\alpha}' = 0,958$ при доверительном интервале в пределах $0,938 \dots 0,977$, а показатель снижения КПД $\bar{\beta}' = 0,932$ при доверительном интервале $0,907 \dots 0,958$. Исходя из представленных данных по показателю снижения пропускной способности при нормальном состоянии русел каналов, во время эксплуатации происходит снижение пропускной способности каналов на $2,3 \dots 6,2 \%$, а КПД — на $4,2 \dots 9,3 \%$, что можно принять как

допускаемые эксплуатационные значения по отношению к проектным расходам и КПД каналов: $Q_{\text{экс}} = (0,938 \dots 0,977)Q_{\text{пр}}$ и $\eta_{\text{экс}} = (0,907 \dots 0,958)\eta_{\text{пр}}$.

Указанные положения могут быть приняты как нормативные и соответственно включены в качестве дополнения к своду правил по проектированию оросительных систем и сооружений.

3. На основании опыта эксплуатации оросительных каналов гидромелиоративных систем в дополнение к существующим критериям предложен критерий по допускаемым потерям на фильтрацию, усовершенствованы критерии их гидравлической эффективности по пропускной способности, допускаемым скоростям, относительной ширине русла и КПД.

4. По результатам компьютерной обработки натурных данных гидравлической эффективности оросительных каналов получено семь эмпирических зависимостей $n = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$ при нормальном состоянии каналов и $n_{\text{зар}} = f(Q)$ — при значительном зарастании каналов в облицовке и в земляном русле, достоверность которых подтверждена коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 (R^2 = 0,805 \dots 0,924)$.

5. Сравнение значений коэффициентов шероховатости 15 каналов и участков при зарастании с проектными данными показывает, что при сильном зарастании коэффициенты $n_{\text{зар}}$ для каналов в облицовке значительно возрастают — в $1,7 \dots 2,5$ раза — за счет гидравлического сопротивления, которое оказывают водоросли. Для каналов в земляном русле характерна еще большая степень зарастания, которая приводит к увеличению коэффициентов $n_{\text{зар}}$ до $2,5 \dots 4,0$ раз. При этом показатели снижения пропускной способности α' уменьшаются в каналах с зарастанием до $0,425 \dots 0,450$ — для облицованных русел и до $0,238 \dots 0,373$ — для земляных русел против каналов без зарастания (с нормальным состоянием).

6. Проведенное сравнение результатов расчета коэффициентов шероховатости заросших русел по теоретическим формулам (26)–(28) с ранее полученными натурными данными показало достаточно близкое их совпадение на примере трех каналов в земляном и облицованном руслах (Нижне-Донского МК, Азовского МК, распределителя Бг-Р-7) с отклонением их значений в пределах $11 \dots 18 \%$. Указанное сравнение результатов расчета подтверждает справедливость применения теоретических формул для гидравлических расчетов заросших русел каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М. : Колос, 1979. 255 с.

2. Долгушев И.А. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов. М. : Колос, 1975. 136 с.

3. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / пер. с англ. канд. техн. наук И.В. Филимоновой. М. : Стройиздат, 1969. 464 с.
4. Косиченко Ю.М., Гуринов К.Г., Самойленко А.В. Гидравлическая эффективность крупных каналов Северного Кавказа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2005. Т. 7. № 4. С. 378–391.
5. Косиченко Ю.М., Угроватова Е.Г. Повышение эффективности эксплуатации крупных каналов и обоснование формы и гидравлических сопротивлений русел полигонального сечения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 2 (198). С. 96–103. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-2-96-103
6. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Высоконадежные конструкции противофильтрационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. С. 18–25.
7. Беновицкий Э.Л. Вывод расчетных зависимостей для коэффициента шероховатости частично заросшего русла // Водные ресурсы. 1988. № 1. С. 68–74.
8. Хубларян М.Г., Фролов А.П., Зырянов В.Н. Моделирование водных потоков при наличии высшей водной растительности // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 6. С. 668–674.
9. Huai W.X., Zhang J., Wang W.J., Katul G.G. Turbulence structure in open channel flow with partially covered artificial emergent vegetation // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 573. Pp. 180–193. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071
10. Nezu I., Sanjou M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows // Journal of Hydro-Environment Research. 2008. Vol. 2. Issue 2. Pp. 62–90. DOI: 10.1016/j.jher.2008.05.003
11. Melis M., Poggi D., Giovanni, Fasanella O.D., Cordero S., Katul G.G. Resistance to Flow on a Sloping Channel Covered by Dense Vegetation following a Dam Break // Water Resources Research. 2019. Vol. 55. Issue 2. Pp. 1040–1058. DOI: 10.1029/2018wr023889
12. Bandurin M.A., Voloshukhin V.A., Vanzha V.V. Technology for Water Economy Monitoring of Technical State of Closed Drainage of Irrigation System // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. C. 214–218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.214
13. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., Voloshukhin V.A. Remote Monitoring of Reliability for Water conveyance hydraulic Structures // Material Science Forum. 2018. Vol. 931. C. 209–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.209
14. Дзекэлеску Н. Рациональное распределение воды в оросительной сети. М. : Колос, 1982. 158 с.
15. Латышенков А.М. Каналы систем водоснабжения и ирригации. М. : Стройиздат, 1972. 153 с.
16. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л. : Энергоиздат, 1982. 672 с.
17. Косиченко Ю.М. Расчет коэффициентов шероховатости заросших русел каналов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 1997. № 2. С. 75–80.
18. Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R. Life-time predictions of exposed geotextiles and geomembranes // Geosynthetics International. 2017. Vol. 24. Issue 2. Pp. 198–212. DOI: 10.1680/jgein.16.00026
19. AbdelRazek A.Y., Kerry Rowe R. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants // Geotextiles and Geomembranes. 2019. Vol. 47. Issue 1. Pp. 60–74. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.10.001
20. Prabakaran P.A., Sathyamoorthy G.L., Adhithayan M. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geo synthetic material, cement mortar and material lining // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 7. № 4S. Pp. 81–83.
21. Cen W., He H., Li D. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control // Advances in Science and Technology of Water Resources. 2017. Vol. 37. Issue 3. Pp. 61–65. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2017.03.010
22. Koerner G.R., Koerner R.M. The durability of exposed geomembrane covers // Geotechnical Frontiers 2017. 2017. DOI: 10.1061/9780784480434.014
23. Sainov M.P., Zverev A.O. Workability of high rockfill dam with a polymer face // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 7 (75). Pp. 76–83. DOI: 10.18720/MCE.75.7
24. Soltskiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 1. Pp. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.77.1
25. Righetti M. Flow analysis in a channel with flexible vegetation using double-averaging method // Acta Geophysica. 2008. Vol. 56. Issue 3. Pp. 801–823. DOI: 10.2478/s11600-008-0032-z
26. Raki L., Beaudoin J.J., Alizadeh R. Nanotechnology applications for sustainable cement-based products. Nanotechnology in Construction 3. Prague, Czech Republic, 2009. Pp. 119–124. DOI: 10.1007/978-3-642-00980-8_15
27. Mondal P., Shah S.P., Marks L.D. Nanomechanical properties of interfacial transition zone in concrete. Nanotechnology in Construction 3. Prague, Czech Republic, 2009. Pp. 315–320. DOI: 10.1007/978-3-642-00980-8_42
28. Lau T.W., Afshar N.R. Effect of roughness on discharge // Journal of Civil Engineering, Science and Technology. 2013. Vol. 4. Issue 3. Pp. 29–33. DOI: 10.33736/jcest.124.2013

Поступила в редакцию 12 июня 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 июля 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юрий Михайлович Косиченко** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела гидротехнических сооружений и гидравлики; **Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (РосНИИПМ)**; 346400, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190; РИНЦ ID: 352994, Scopus: 6603198909, ResearcherID: I-3701-2014, ORCID: 0000-0002-9648-6441; Kosichenko-11@mail.ru;

Олег Андреевич Баев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела гидротехнических сооружений и гидравлики; **Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (РосНИИПМ)**; 346400, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190; РИНЦ ID: 699695, Scopus: 57196105439, ResearcherID: L-6929-2016, ORCID: 0000-0003-0142-4270; Oleg-Baev1@yandex.ru.

REFERENCES

1. Altunin V.S. *Reclamation channels in earthen channels*. Moscow, Kolos, 1979; 255. (rus.).
2. Dolgushev I.A. *Improving the operational reliability of irrigation canals*. Moscow, Kolos, 1975; 136. (rus.).
3. Chow V.T. *Open channel hydraulics* / translation from English Cand. tech. Sciences I.V. Filimonova. Moscow, Stroyizdat, 1969; 464. (rus.).
4. Kosichenko Yu.M., Gurin K.G., Samoilenko A.V. Hydraulic efficiency of large canals of the North Caucasus. *Water industry of Russia: problems, technologies, management*. 2005; 7(4):378-391. (rus.).
5. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G. Increasing efficiency of operation large channels and substantiation of the form and hydraulic resistance of rusels of the polygonal section. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2018; 2(198):96-103. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-2-96-103 (rus.).
6. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Highly reliable structures of anti-seepage coatings of canals and reservoirs, criteria for their efficiency and reliability. *Hydro-technical Construction*. 2014; 8:18-25. (rus.).
7. Benovitsky E.L. Derivation of the calculated dependencies for the roughness coefficient of a partially overgrown channel. *Water Resources*. 1988; 1:68-74. (rus.).
8. Khublaryan M.G., Frolov A.P., Zyryanov V.N. Modeling water flow in the presence of higher vegetation. *Water Resources*. 2004; 31(6):668-674. (rus.).
9. Huai W.X., Zhang J., Wang W.J., Katul G.G. Turbulence structure in open channel flow with partially covered artificial emergent vegetation. *Journal of Hydrology*. 2019; 573:180-193. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071
10. Nezu I., Sanjou M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2008; 2(2):62-90. DOI: 10.1016/j.jher.2008.05.003
11. Melis M., Poggi D., Giovanni, Fasanella O.D., Cordero S., Katul G.G. Resistance to Flow on a Sloping Channel Covered by Dense Vegetation following a Dam Break. *Water Resources Research*. 2019; 55(2):1040-1058. DOI: 10.1029/2018wr023889
12. Bandurin M.A., Voloshukhin V.A., Vanzha V.V. Technology for Water Economy Monitoring of Technical State of Closed Drainage of Irrigation System. *Materials Science Forum*. 2018; 931:214-218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.214
13. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., Voloshukhin V.A. Remote Monitoring of Reliability for Water conveyance hydraulic Structures. *Material Science Forum*. 2018; 931:209-213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.209
14. Deskelescu N. *Rational water distribution in the irrigation network*. Moscow, Kolos, 1982; 158. (rus.).
15. Latyshnikov A.M. *Canals for water supply and irrigation systems*. Moscow, Stroyizdat, 1972; 153. (rus.).
16. Chugaev R.R. *Hydraulics*. Leningrad, Energoizdat, 1982; 672. (rus.).
17. Kosichenko Yu.M. Calculation of the roughness coefficients of overgrown canal channels. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 1997; 2:75-80. (rus.).
18. Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*. 2017; 24(2): 198-212. DOI: 10.1680/jgein.16.00026
19. AbdelRazek A.Y., Kerry Rowe R. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants. *Geotextiles and Geomembranes*. 2019; 47(1):60-74. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.10.001
20. Prabakaran P.A., Sathyamoorthy G.L., Adhikayan M. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geo synthetic material, cement mortar and material lining. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 7(4S):81-83.
21. Cen W., He H., Li D. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams

and measures of seepage control. *Advances in Science and Technology of Water Resources*. 2017; 37(3):61-65. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2017.03.010

22. Koerner G.R., Koerner R.M. The durability of exposed geomembrane covers. *Geotechnical Frontiers 2017*. 2017. DOI: 10.1061/9780784480434.014

23. Sainov M.P., Zverev A.O. Workability of high rockfill dam with a polymer face. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 7(75):76-83. DOI: 10.18720/MCE.75.7

24. Solskiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1:3-12. DOI: 10.18720/MCE.77.1

25. Righetti M. Flow analysis in a channel with flexible vegetation using double-averaging method.

Acta Geophysica. 2008; 56(3):801-823. DOI: 10.2478/s11600-008-0032-z

26. Raki L., Beaudoin J.J., Alizadeh R. *Nanotechnology applications for sustainable cement-based products*. Nanotechnology in Construction 3. Prague, Czech Republic, 2009; 119-124. DOI: 10.1007/978-3-642-00980-8_15

27. Mondal P., Shah S.P., Marks L.D. *Nanomechanical properties of interfacial transition zone in concrete*. Nanotechnology in Construction 3. Prague, Czech Republic, 2009; 315-320. DOI: 10.1007/978-3-642-00980-8_42

28. Lau T.W., Afshar N. R. Effect of roughness on discharge. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*. 2013; 4(3):29-33. DOI: 10.33736/jcest.124.2013

Received June 12, 2020.

Adopted in a revised form on July 7, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

B I O N O T E S: **Yurij M. Kosichenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Hydrotechnical Structures and Hydraulics; **Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems**; 190 Baklanovsky avenue, Novocherkassk, 346400, Russian Federation; ID RISC: 352994, Scopus: 6603198909, ResearcherID: I-3701-2014, ORCID: 0000-0002-9648-6441; Kosichenko-11@mail.ru;

Oleg A. Baev — Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Department of Hydrotechnical Structures and Hydraulics; **Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems**; 190 Baklanovsky avenue, Novocherkassk, 346400, Russian Federation; ID RISC: 699695, Scopus: 57196105439, Researcher ID: L-6929-2016, ORCID: 0000-0003-0142-4270; Oleg-Baev1@yandex.ru.

Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса

В.А. Головесов¹, А.Г. Первов¹, Г.Д. Сухов², Г.Я. Рудакова²

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

²АО «Научный центр “Малотоннажная химия”»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Выбор эффективного антискаланта — задача, с которой сталкиваются все промышленные предприятия, поскольку от него зависит величина эксплуатационных затрат. Поэтому предприятия перед закупкой антискаланта требуют проведения опытно-промышленных или, как минимум, лабораторных исследований. Процесс выбора сервизных реагентов промышленными предприятиями для обслуживания установок обратного осмоса сопровождается оценкой всех значимых факторов — от эффективности ингибирования до цены продукции. Однако анализ научной и технической литературы показывает, что при оценке антискалантов учитывается только эффективность ингибирования без учета влияния осадка на величину рабочего давления, качество пермеата и снижение производительности. Проведение испытаний должно соответствовать реальным условиям эксплуатации или быть максимально близким к ним. Следовательно, для определения эффективных дозировок необходимо проведение лабораторных исследований на «реальной» воде и с учетом реальной степени извлечения. Представлены результаты сравнения ингибирующей способности двух антискалантов, проведенные на «реальной» воде промышленного предприятия. Проведена оценка влияния выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат. По результатам исследования получены зависимости содержания Ca^{2+} и адсорбции антискаланта от его дозы. В процессе экспериментов были определены эффективные дозировки антискалантов.

Материалы и методы. Использовались следующие антискаланты: «Аминат™К» (ООО «НПФ “Траверс”», Россия), Jurbysoft M422 (Jurbyswatertech, Литва). Исследования проводились с использованием промышленно выпускаемых рулонных фильтрующих элементов (модель RE 1812-80 CSM, R-80G) (CSM, Корея).

Результаты. Получены экспериментально определенные зависимости содержания Ca^{2+} от величины выхода фильтра установки обратного осмоса при различных дозах антискаланта, составлявших 2, 4 и 6 мг/л. Показано, что при обработке воды антискалантом последний адсорбируется на поверхности кристаллов, и чем больше доза антискаланта, тем в большем количестве он адсорбируется.

Выводы. Показано, что при одинаковых дозировках антискалант «Аминат™К» эффективнее предотвращает выпадение осадка карбоната кальция при эксплуатации мембранных установок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, карбонат кальция, эксплуатационные затраты обратного осмоса, антискаланты, рост кристаллов, адсорбция антискаланта

Благодарности: Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90078.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Головесов В.А., Первов А.Г., Сухов Г.Д., Рудакова Г.Я. Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1163–1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1163-1174

Impact of chosen antiscalant on the operating costs value for reverse osmosis systems

Vladimir A. Golovesov¹, Alexey G. Pervov¹, Genadiy D. Suhov², Galina Ya. Rudakova²

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

²JSC “Fine Chemicals R&D Centre”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The choice of an effective antiscalant is an issue that all industrial enterprises have to face, as the operating costs value depends on it. Therefore, enterprises require experimental-industrial or at least laboratory tests before ordering a particular antiscalant. The process of selecting reagents for the maintenance of reverse osmosis systems by industrial enterprises is accompanied by the evaluation of all significant factors, from the inhibition efficiency to the product price. However, the analysis of scientific and technical literature shows that only the inhibition efficiency is taken into account when evaluating antiscalants, while the effect of sediment on the operating pressure, permeate quality and performance reduction are ignored. The tests should be carried out under actual operating conditions or be as close to them as possible. Therefore, in order to determine effective dosages, it is necessary to conduct laboratory tests on “actual” water while taking into account

the actual recovery rate. This article presents the results of comparison of inhibitory property of two antiscalants, carried out on "actual" water from an industrial enterprise. An estimation of the effect of antiscalant choice on the operating costs value was carried out. The dependences of Ca^{2+} content and antiscalant adsorption on its dose are obtained. Over the course of experiments, effective dosages of antiscalants were determined.

Materials and methods. The following antiscalants were used as part of this research: "AminatTMK" (NPF "Travers", LLC, Russia), Jurbysoft M422 (Jurbywatertech, Lithuania). The research was conducted using industrial roll filters (model RE 1812-80 CSM, R-80G) (CSM, Korea).

Results. Experimentally determined dependences of Ca^{2+} content on the filtrate output value of reverse osmosis systems at different antiscalant doses of 2, 4 and 6 mg/l were obtained. It was shown that during water treatment with antiscalant the latter is adsorbed on the crystal surface, and the higher the antiscalant dose, the more of it is adsorbed.

Conclusions. It was shown that at the same dosage the antiscalant "AminatTMK" is more effective at preventing sedimentation of calcium carbonate during the operation of membrane units.

KEYWORDS: reverse osmosis, calcium carbonate, reverse osmosis operating costs, antiscalants, crystal growth, antiscalant adsorption

Acknowledgments. The authors would like to express gratitude to the Russian Foundation for Basic Research. The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project No. 19-38-90078.

FOR CITATION: Golovesov V.A., Pervov A.G., Suhov G.D., Rudakova G.Ya. Impact of chosen antiscalant on the operating costs value for reverse osmosis systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1163-1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1163-1174 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время опреснение воды методом обратного осмоса получило широкое распространение как эффективный метод обессоливания/опреснения воды в различных областях промышленности [1]. Сейчас обессоливание воды методом обратного осмоса широко используется как на отечественных, так и на зарубежных предприятиях. Наиболее популярен метод обратного осмоса при опреснении солоноватых вод из-за его способности задерживать 97...99 % всех растворенных в воде солей [2, 3]. Однако подготовка воды методом обратного осмоса считается экономически целесообразной тогда, когда степень извлечения пермеата находится на уровне не ниже 70 % [1, 2]. При такой степени извлечения количество малорастворимых солей Ca^{2+} и Mg^{2+} , всегда присутствующих в питательной воде, увеличивается в 4 раза и, соответственно, увеличивается вероятность их осаждения на мембранах, что в конечном итоге влияет на экономическую эффективность подобных процессов [4–6]. Осадки малорастворимых солей, такие как CaCO_3 и CaSO_4 , всегда образуются в процессе эксплуатации обратноосмотических установок. Поэтому даже при умеренном уровне извлечения пермеата существует высокая вероятность неорганического загрязнения [5]. Осадки малорастворимых солей накапливаются на мембране и связанных с ней компонентах, постепенно приводя к снижению потока пермеата и увеличению перепада давления на элементе [7, 8].

Наиболее распространенным методом контроля и минимизации влияния осадка малорастворимых солей является дозирование добавляемых в воду ингибиторов, или так называемых антискалантов [9–11]. Антискаланты дозируются перед введением в установки обратного осмоса с расходом от 4 до 7 г/м³. Чаще всего антискаланты по-

ставляются в виде водных растворов, содержащих от 15 до 35 % активного вещества, и их стоимость может варьироваться от 200 до 400 руб./кг товарного реагента, что в сумме составляет сотни тысяч рублей за партию.

В России поставки ингибирующих веществ осуществляются как отечественными, так и зарубежными организациями. Поставляемые антискаланты отличаются не только стоимостью, но и основным действующим веществом, необходимой дозировкой и способностью к ингибированию [8, 12].

Для определения частоты химических промыслов установок обратного осмоса эксплуатационному или обслуживающему персоналу необходимы данные о скорости роста отложений малорастворимых солей Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые должны предоставляться компаниями — поставщиками антискалантов. Однако поставщики антискалантов не предоставляют необходимых сведений о скорости роста отложений, зависящих от условий эксплуатации установок обратного осмоса [13–15].

Компания — поставщик антискалантов, предоставляя данные о необходимой дозировке, в основном отталкивается от данных об общей жесткости исходной воды. Однако необходимое количество антискаланта зависит не только от количества малорастворимых солей Ca^{2+} и Mg^{2+} , но и от температуры, pH, общего состава воды и гидравлических условий системы обратного осмоса [1, 16, 17]. Также авторами данной статьи в ряде предыдущих работ было показано, что в определенном диапазоне содержания солей жесткости эффективная дозировка антискаланта не влияет на эффективность ингибирования.

Чаще всего эти дозировки берутся с запасом, что влечет за собой перерасход антискаланта и, как следствие, ненужное увеличение эксплуатационных затрат. Поэтому предприятия, закупающие

антискаланта, прежде чем его приобрести, требуют проведения опытно-промышленных или, как минимум, лабораторных испытаний по оценке эффективности работы антискаланта.

Однако, как показал анализ научной и технической литературы, испытания по определению эффективности антискалантов сводятся к оценке их ингибирующей способности по отношению к малорастворимым соединениям, таким как CaCO_3 и CaSO_4 . Кристаллы осажденных солей накапливаются на мембране и в мембранных каналах, что приводит к снижению потока пермеата и увеличению перепада давления на элементе [18]. Кроме того, удаление загрязнений требует химической очистки мембранных элементов [19].

Все эти факторы приводят к уменьшению количества очищенной воды — пермеата, а также снижению его качества [20, 21].

Следовательно, в результате выпадения в осадок малорастворимых солей происходит увеличение эксплуатационных затрат на обратноосмотическую установку из-за более высокого потребления энергии [22, 23], простоев системы [4, 24] и затрат на очистку мембраны [2].

Таким образом, целью данной работы было проведение лабораторных исследований по определению эффективных дозировок различных антискалантов для АО «Щекиноазот» и влияние выбранного антискаланта на величину эксплуатационных затрат. В работе использовался серийно выпускаемый отечественной компанией ООО «НПФ «Траверс»» антискаланта «АминатTMК», а также антискаланта зарубежного производства марки Jurbysoft M422.

«АминатTMК» представляет собой водный раствор нитрилотриметиленфосфоновой и иминодиметиленфосфоновой кислот [15, 18], Jurbysoft M422 — это водный раствор оксиэтилидендифосфоновой и нитрилотриметиленфосфоновой кислот.

Программа исследований включала в себя четыре этапа:

- 1-й этап — количественное определение содержания Ca^{2+} в мембранном аппарате с необходимой степенью извлечения в присутствии антискалантов «АминатTMК» и Jurbysoft M422 в различных дозах: 2, 4 и 6 мг/л по массе товарного продукта;
- 2-й этап — определение количества адсорбированного антискаланта «АминатTMК» и Jurbysoft M422 в мембранном аппарате в процессе проведения экспериментов;
- 3-й этап — оценка качества пермеата и производительности обратноосмотической установки с наиболее эффективной дозой антискаланта;
- 4-й этап — определение влияния антискаланта на величину эксплуатационных затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования образования кристаллических осадков солей с низкой растворимостью в воде в экспериментах авторы данной статьи использовали рулонный мембранный элемент (модель 1812-CSM, R-80G) производства CSM (Корея).

Лабораторные эксперименты выполнялись на стенде, представленном на рис. 1. Эксперименты по определению эффективности антискалантов проводились в режиме концентрирования, имитиру-

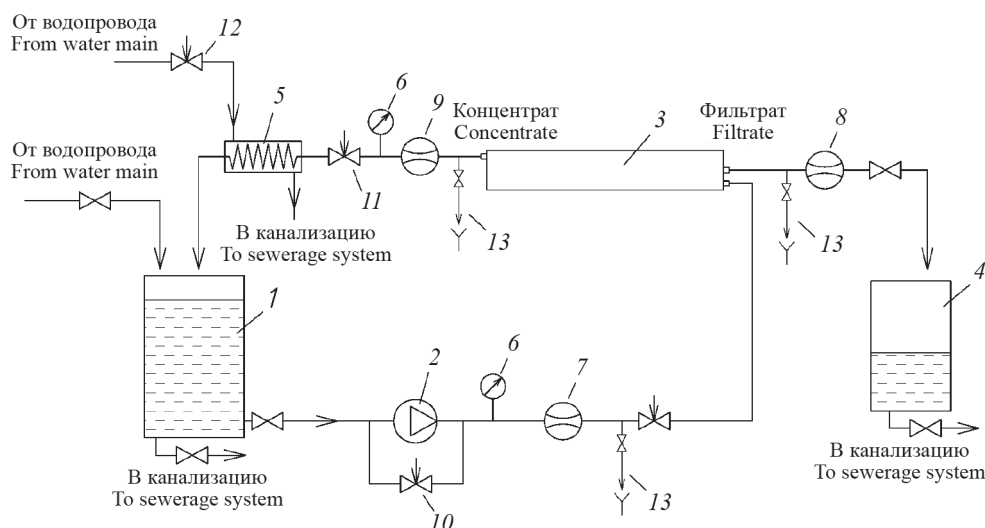


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — бак исходной воды; 2 — насос; 3 — обратноосмотический модуль; 4 — бак пермеата; 5 — теплообменник; 6 — манометры; 7 — расходомер исходной воды; 8 — расходомер пермеата; 9 — расходомер концентрата; 10 — вентиль байпаса; 11 — вентиль концентрата; 12 — регулирующие вентили; 13 — пробоотборник

Fig. 1. Laboratory unit schematic: 1 — source water tank; 2 — pump; 3 — reverse osmosis module; 4 — permeate tank; 5 — heat exchanger; 6 — pressure gages; 7 — source water flow meter; 8 — permeate flow meter; 9 — concentrate flow meter; 10 — bypass valve; 11 — concentrate bypass; 12 — control valves; 13 — sampling device

ющем необходимую степень извлечения. Насосом 2 исходная вода из бака 1 подавалась в обратноосмотический модуль 3, где разделялась на два потока: пермеат и концентрат. Концентрат возвращали в исходный бак 1. Необходимое давление устанавливалось регулирующим клапаном (вентилем концентрата) 12, также этим клапаном регулировали расход концентрата. Степень концентрирования оценивалась по изменению объема воды в баке 1. Отбор проб концентрата производился из линии концентрата, а отбор проб пермеата — из линии пермеата.

Оценку эффективности проводили по следующим параметрам: электропроводность, общая жесткость, содержание ионов кальция, общая щелочность, pH. Кондуктометр Nalcometer использовали для измерения общего солесодержания; определение pH производили лабораторным pH-метром марки «МАРК 903». Общая жесткость, щелочность определялись титрованием по ГОСТ 31954–2012¹; содержание ионов кальция — титрованием по ЦВ 3.18.05-2005². Содержание ионов магния определялось как разность между общей жесткостью и содержанием ионов кальция. Количество ингибитора определяли по содержанию ионов PO_4^{3-} .

Все эксперименты проводились с водой, используемой на предприятии АО «Щекиноазот». На предприятии АО «Щекиноазот» вода забирается из поверхностного источника — р. Упа, далее исходная речная вода после подогревания и фильтрации на механических фильтрах, загруженных гидроантрацитом, подается на блок самопромывных механических фильтров с рейтингом фильтрации 300 мкм. Перед механическими фильтрами в воду дозируются коагулянт и гипохлорит натрия для улучшения качества очистки на блоках ультрафильтрации. После контактной коагуляции вода поступает на блок ультрафильтрации (УФ) из шести установок «ЭНЕРГО УВ-100», в состав которых

входят мембранные модули (32 шт. в каждой, марки dizzer5000plus). Каждая установка ультрафильтрации работает в периодическом режиме, чередуя стадии фильтрации с накоплением загрязнений на поверхности мембран и стадии обратной промывки ультрафильтратом и химически усиленной обратной промывки.

Вода, прошедшая через мембраны (ультрафильтрат), поступает в баки, откуда подается на пять установок обратного осмоса (УОО) (первая ступень обессоливания). В состав каждой УОО входит 108 мембранных элементов Lewabrane RO B370 HF. Состав воды после установок ультрафильтрации представлен в табл. 1.

Для испытаний по определению эффективных дозировок антискалантов было отобрано 50 л воды после установок ультрафильтрации. Оценка эффективности антискалантов проводилась по количеству образовавшегося осадка на мембранном элементе. Расчет величины образовавшегося осадка производили по разности содержания ионов Ca^{2+} в баке исходной воды и Ca^{2+} в концентрате, в заданный момент времени [9]. Величина адсорбированного антискаланта определялась по разработанной ранее методике [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность антискаланта оценивалась по стабильности концентрации осадкообразующих катионов в воде (прежде всего, кальция) во времени после концентрирования их на обратноосмотическом элементе в 2–4 раза. Испытания проводились при первоначальной дозе антискаланта в ультрафильтрате 2, 4, 6 мг/л. Холостой опыт — без добавки антискаланта.

Данные, представленные на рис. 2, а, демонстрируют содержание Ca^{2+} в зависимости от коэффициента концентрирования при использовании ингибитора отложений «АминатTMК». На рис. 2, б показана пересчитанная на содержание CaCO_3 масса образовавшегося осадка в зависимости от коэффициента концентрирования, полученная также при использовании ингибитора отложений «АминатTMК». Коэффициент концентрирования определяется как отношение объема воды в баке 1 (см. рис. 1) в начале эксперимента к объему воды в заданный момент времени.

¹ ГОСТ 31954–2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости.

² Качество воды. Методика выполнения измерений элементного состава питьевых, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме : (ЦВ 3.18.05-2005. ФР.1.31.2005.01714) : введена в действие 11.05.2005.

Табл. 1. Состав воды после выхода из установок ультрафильтрации

Table 1. Water composition at ultrafiltration unit output

Показатели Indicators	Ca, мг-экв/л Ca, mg-eq/l	Жесткость, мг-экв/л Hardness, mg-eq/l	Щелочность, мг-экв/л Alkalinity, mg-eq/l	pH	PO_4 , мг/л PO_4 , mg/l	Электропроводность, мкСм/см Conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Значения Values	6	8,4	3,4	8	0,8	800

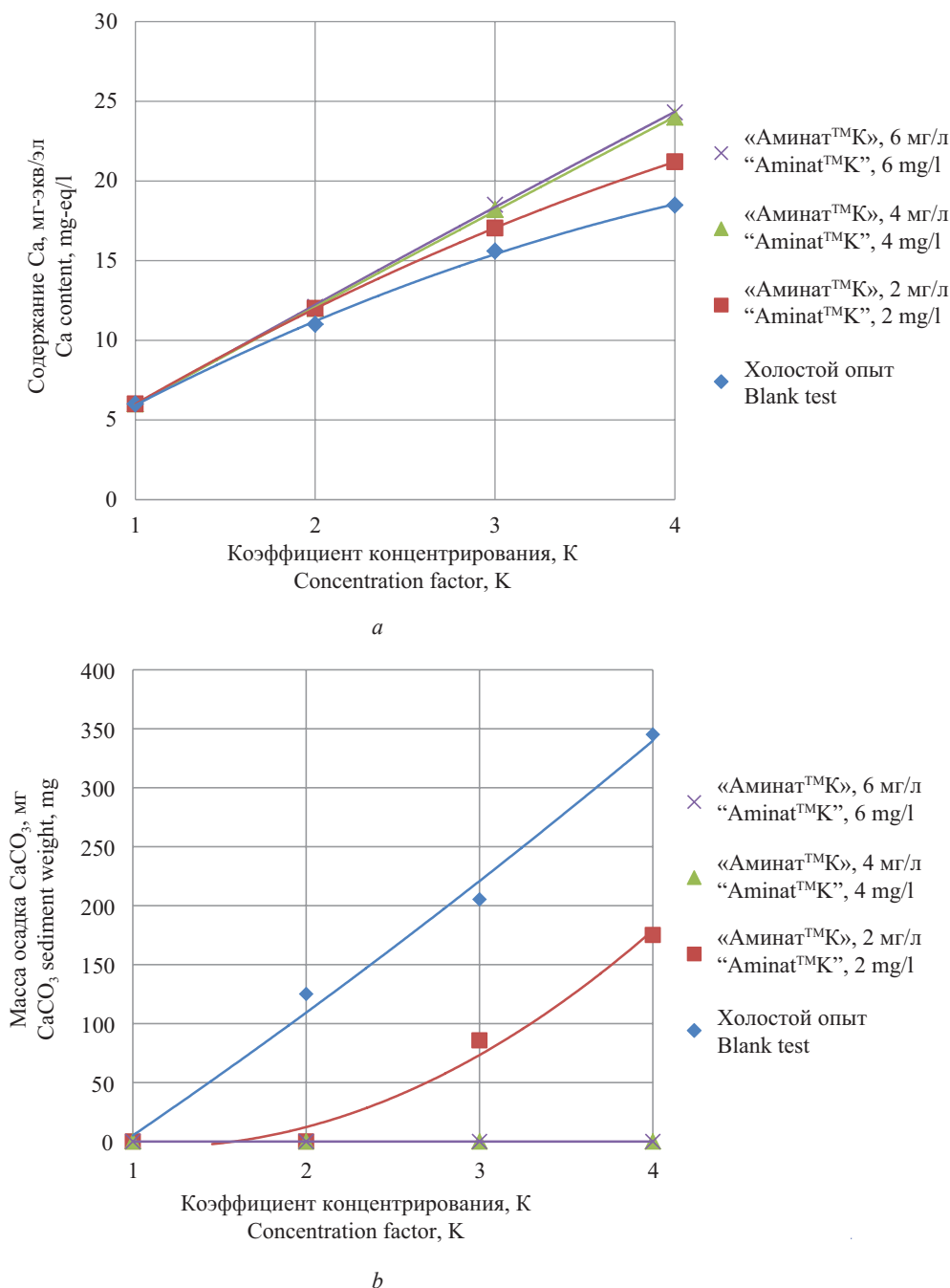


Рис. 2. Результаты экспериментов по определению эффективности антискаланта «Аминат™К»: *a* — зависимость содержания ионов Ca^{2+} от коэффициента концентрирования K ; *b* — зависимость массы накопленного осадка карбоната кальция от коэффициента концентрирования K

Fig. 2. “Aminat™K” antiscalant efficiency experiment results: *a* — dependence of Ca^{2+} ions content on concentration factor K ; *b* — dependence of accumulated calcium carbonate sediment weight on concentration factor K

Величина выхода пермеата α , определяемая как отношение расхода пермеата к расходу исходной воды, связана со значением коэффициента концентрирования отношением: $K = 1/(1 - \alpha)$ [6, 8]. Как показали результаты экспериментов, представленных на рис. 2, эффективными дозами для предотвращения образования осадка карбоната кальция являются дозы 4 и 6 мг/л, при которых

выпадение осадка не наблюдалось. Менее эффективной оказалась доза 2 мг/л, однако даже при такой дозировке наблюдается меньшее по сравнению с холостым опытом образование осадка карбоната кальция.

Следующим этапом работы было исследование эффективности антискаланта Jurbysoft M422. Результаты исследований представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при использовании анти-скаланта Jurbysoft состав воды остается стабильным до значений $K = 2 \dots 2,5$, эффективность ингибирования немного увеличивается с увеличением концентрации антискаланта.

Следующим этапом изучения эффективности антискаланта является оценка их адсорбции на поверхности кристаллов карбоната кальция. На этой стадии определяется количество адсорби-

рованного антискаланта по разности его содержания в начале эксперимента и в заданный момент времени.

Определение количества адсорбированного антискаланта также позволяет определить его эффективность. На этом этапе работ представляет интерес наблюдение за содержанием антискаланта при различных дозировках в зависимости от коэффициента концентрирования.

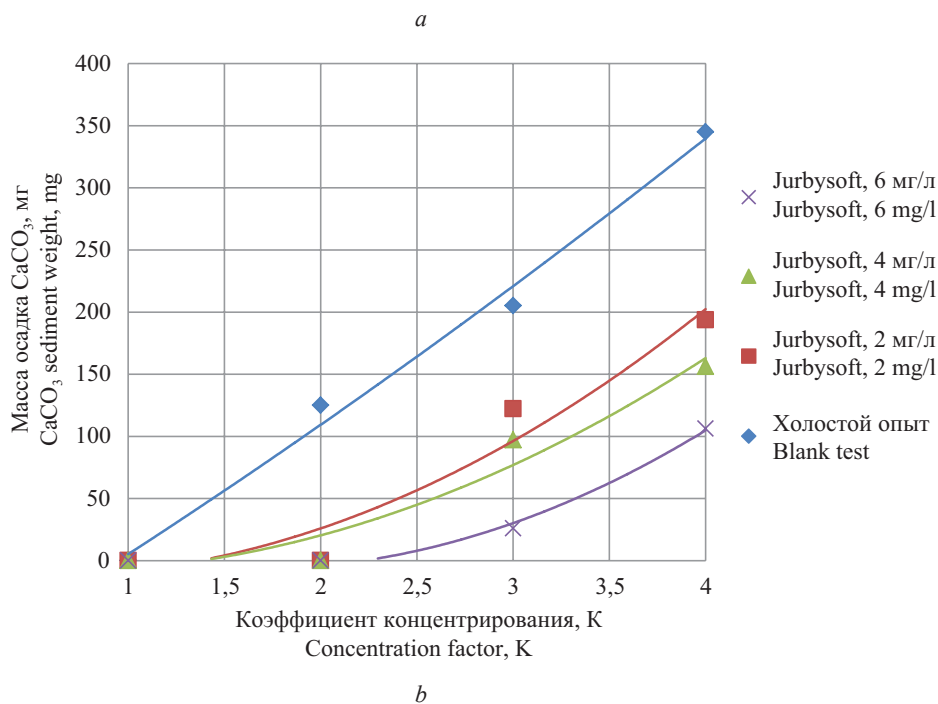
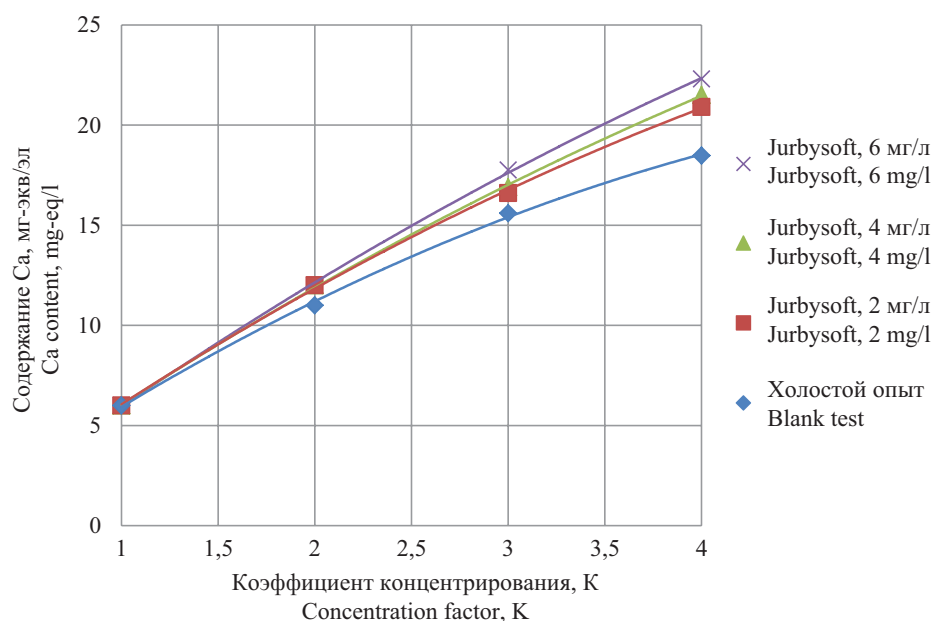


Рис. 3. Результаты экспериментов по определению эффективности антискаланта Jurbysoft M422: а — зависимость содержания ионов Ca^{2+} от коэффициента концентрирования К; б — зависимость массы накопленного осадка карбоната кальция от коэффициента концентрирования К

Fig. 3. Jurbysoft M422 antiscalant efficiency experiment results: а — dependence of Ca^{2+} ions content on concentration factor К; б — dependence of accumulated calcium carbonate sediment weight on concentration factor К

Наиболее вероятный механизм действия антискалантов заключается в адсорбции последнего на активных центрах образующихся кристаллов. Поскольку работа обратноосмотической установки связана с постоянным концентрированием, то при прохождении этапа пересыщения будут образовываться новые кристаллические осадки, и содержание антискаланта должно постепенно снижаться.

Содержание антискаланта в воде определяли по содержанию иона PO_4^{3-} . Так как содержание активного вещества в исследуемых антискалантах разное, исследования проводились при дозировках (2, 4 и 6 мг/л), взятых по массе товарного продукта. После добавления антискаланта дозировки последнего пересчитывались на содержание ионов PO_4^{3-} . Результаты исследований данного этапа представлены на рис. 4.

Как показали результаты экспериментов, представленные на рис. 4 в виде кривых зависимостей концентрации антискаланта от коэффициента концентрирования K , количество антискаланта постоянно снижается, однако антискалант Jurbysoft M422 (рис. 4, *b*) адсорбировался интенсивнее антискаланта «АминатTMК» (рис. 4, *a*) в процессе концентрирования.

Как уже было сказано выше, дозирование антискалантов является критическим фактором, который влияет на технико-экономические показатели опреснения. Именно поэтому данная работа была начата с серии экспериментов по определению эффективной дозы антискалантов. От эффективности ингибирования антискаланта зависит дальнейшее образование осадка на поверхности мембранных

элементов. Образование отложений влечет за собой целую череду последствий: более высокий риск образования отложений, ухудшение качества пермеата и снижение потока пермеата из-за повышенного осмотического давления [2]. Поэтому следующим этапом работы было определение производительности и селективности обратноосмотической установки с наиболее эффективными дозировками каждого из антискалантов (рис. 5).

Как видно из рис. 5, в процессе эксплуатации обратноосмотической установки мы наблюдаем снижение производительности и увеличение электропроводности. Причиной падения производительности и ухудшения качества пермеата служит образование отложений малорастворимых солей на поверхности мембраны. Небольшой слой отложений на поверхности мембраны увеличивает гидравлическое сопротивление, что влечет за собой необходимость повышения рабочего давления [22, 24].

Заключительным этапом исследований было определение частоты химических промывок мембранных элементов. Химическая очистка мембранных элементов [25, 26] является наиболее популярным методом восстановления, широко применяемым в отрасли благодаря простоте эксплуатации и эффективности восстановления производительности. Как правило, очистка требуется при одном или нескольких из следующих условий [27]:

- снижение потока пермеата достигло $\sim 10\ldots 15\%$;
- концентрация солей в пермеате повысилась на $10\ldots 15\%$;
- увеличение перепада давления на мембранном элементе становится $\sim 15\ldots 20\%$.

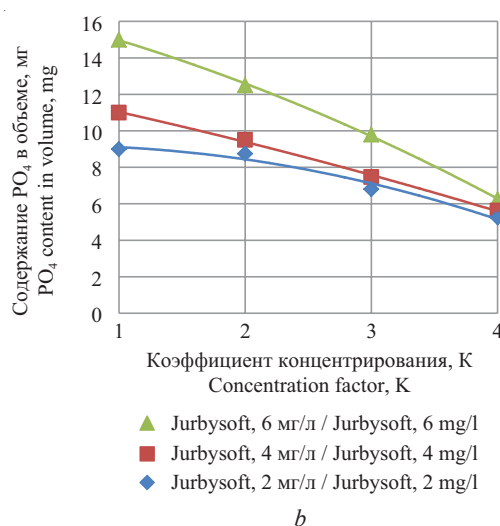
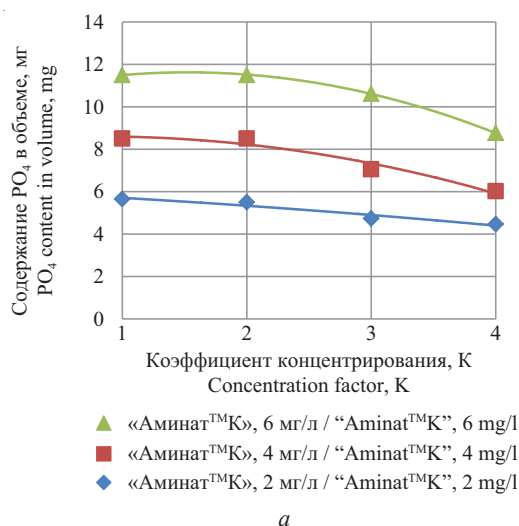


Рис. 4. Результаты экспериментов по определению адсорбции антискаланта: *a* — зависимость количества адсорбированного антискаланта «АминатTMК» в растворе от коэффициента концентрирования K ; *b* — зависимость количества адсорбированного антискаланта Jurbysoft M422 в растворе от коэффициента концентрирования K

Fig. 4. Antiscalant adsorption experiment results: *a* — dependence of the amount of adsorbed “AminatTMК” antiscalant in solution on concentration factor K ; *b* — dependence of the amount of adsorbed Jurbysoft M422 antiscalant in solution on concentration factor K

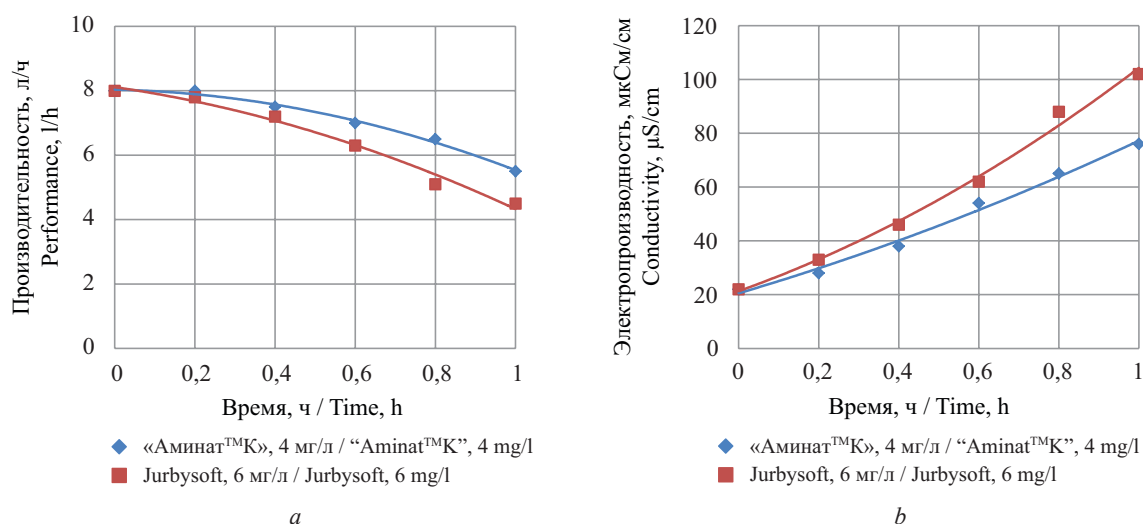


Рис. 5. Результаты экспериментов по определению производительности (a) и селективности (b) обратноосмотической установки при использовании различных антискалентов

Fig. 5. Performance (a) and selectivity (b) experiment results for reverse osmosis systems when using various antiscalants

Исходя из представленных сведений о необходимости промывки, авторами была предпринята попытка спрогнозировать количество промывок лабораторной установки. Во внимание были приняты все необходимые условия: количество накопившегося осадка, снижение потока пермеата, качество пермеата и перепад давления. Результаты представлены на рис. 6.

Рис. 6 демонстрирует, что при учете всех факторов, влияющих на промывку мембранных элементов, и выборе наиболее эффективного антискаланта, с точки зрения ингибирования, количество промывок можно снизить на 30 %. Предполагается, что расходы, связанные с промывкой и утилиза-

цией моющих растворов, могут составлять 5...20 % от общего количества расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание обратноосмотической установки [20, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, показанные на рис. 2–4, касающиеся эффективности ингибирования в различных условиях, можно резюмировать следующим образом:

- антискалант «Аминат™К» в дозах 4 и 6 мг/л продемонстрировал 98...99%-ную эффективность как ингибитор отложений карбоната кальция. Антискалант Jurbysoft M422 при тех же дозах показал

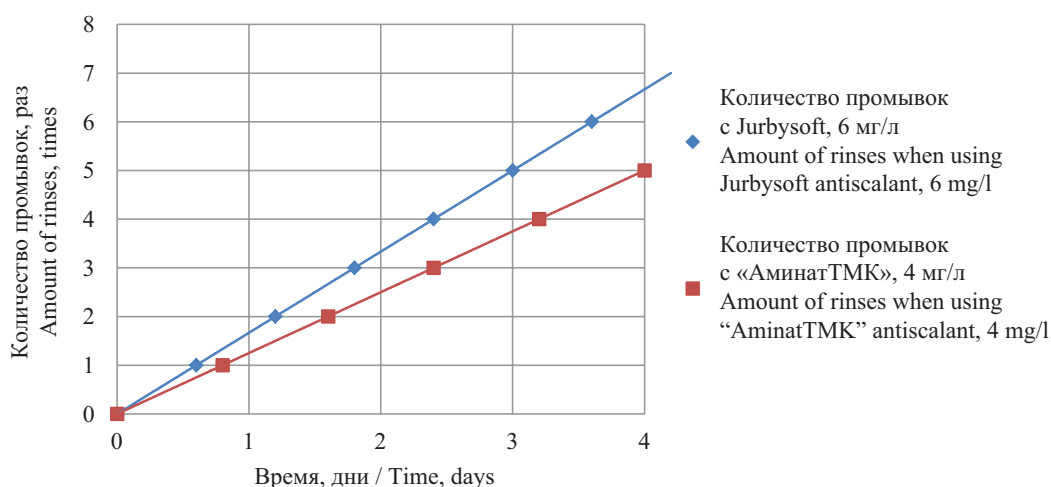


Рис. 6. Результаты прогноза количества промывок в зависимости от используемого антискаланта

Fig. 6. Expected amount of rinses based on the antiscalant used

меньшую ингибирующую эффективность. Наименее эффективными оказались дозы 2 мг/л;

- было отмечено, что антискалант Jurbysoft M422 интенсивнее адсорбируется на поверхности образующихся кристаллов.

Очевидно, что «Аминат™К» по сравнению с Jurbysoft M422 продемонстрировал лучшие результаты по эффективности ингибирования. Вероятно, это связано с тем, что «Аминат™К» представляет собой водный раствор нитрилотриметиленфосфоновой кислоты (НТФ), а антискалант Jurbysoft M422 — водный раствор оксиэтилидендифосфоновой (ОЭДФ) и нитрилотриметиленфосфоновой (НТФ) кислот, а, как известно, соединения ОЭДФ являются менее эффективными по предотвращению образования осадка карбоната кальция.

Отмеченное на рис. 5 снижение потока было незначительным в течение 25 мин работы установки, что соответствует коэффициенту концентрирования ~ 2 , однако далее наблюдается быстрое и непрерывное снижение потока. Это связано с тем, что в определенный момент времени (коэффициент концентрирования $\sim 2,0 \dots 2,5$) начался процесс кристаллизации и выпадения осадка малорастворимых солей, который привел к снижению селективности и дальнейшему уменьшению потока пермеата.

Наиболее заметным результатом влияния загрязнения обратноосмотических мембран осадками малорастворимых солей является долговременное и постоянное снижение потока пермеата. Это объясняется двумя факторами: во-первых, увеличением гидравлического сопротивления мембраны из-за осаждения дополнительных барьерных слоев, поскольку проникающая вода теперь должна проходить через более толстый слой, во-вторых, наличие слоя отложений на поверхности мембраны препятствует обратной диффузии солей (явление также наблюдается в экспериментах по биологическому обрастанию), что приводит к повышенному осмотическому давлению и уменьшению движущей силы чистого давления для обратного осмоса ($P - \pi$).

Когда происходит образование отложений малорастворимых солей, мембрана становится менее проницаемой для воды, и начинается последующее увеличение напора в питательном канале. Чтобы поддерживать поток и, следовательно, необходимую производительность получения пермеата, приложенное давление должно быть соответственно увеличено, следовательно, требуется повысить потребление энергии. Кроме того, это также гарантирует более частую очистку мембран, что не только

увеличивает затраты на техническое обслуживание, но также сокращает срок службы мембран. Все вышеперечисленное приводит к значительному увеличению общих затрат на эксплуатацию и обслуживание установок. Согласно некоторым надежным оценкам, загрязнение осадками малорастворимых солей приводит к увеличению затрат на эксплуатацию установки RO на 10...15 %.

Подводя итог, можно сказать, что от выбора антискаланта напрямую зависит количество эксплуатационных затрат. Как показали результаты данной работы, в итоге, от выбора антискаланта зависят количество образовавшегося осадка, величина рабочего давления, качество пермеата и производительность обратноосмотической установки. К сожалению, далеко не все крупные предприятия РФ используют практику подбора антискаланта в условиях, максимально приближенных к реальности, будь то опытно-промышленные или лабораторные испытания.

На примере предприятия АО «Щекиноазот» авторы попытались доказать необходимость таких испытаний, проводимых с учетом всех необходимых факторов.

Для АО «Щекиноазот» из двух исследуемых антискалантов наиболее эффективным оказался «Аминат™К». Эффективная доза антискаланта «Аминат™К» по предотвращению образования осадка карбоната кальция — 4 мг/л, поскольку она обеспечивает 98...99%-ное ингибирование и, соответственно, более низкие эксплуатационные затраты.

ВЫВОДЫ

В результате работ по сравнению эффективности ингибирующей способности антискалантов «Аминат™К» и Jurbysoft M422 получены следующие результаты:

- «Аминат™К» при одинаковых дозировках 2, 4 и 6 мг/л эффективнее предотвращает образование отложений карбоната кальция, чем Jurbysoft M422;
- доза антискаланта влияет на величину его адсорбции на поверхности кристаллов CaCO_3 : чем выше концентрация антискаланта в растворе, тем больше его адсорбция;
- испытания по подбору эффективной дозировки антискалантов должны проводиться в «реальной» воде с учетом необходимых гидравлических условий работы обратноосмотической установки;
- от выбора антискаланта напрямую зависит величина эксплуатационных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Первов А.Г., Головесов В.А., Спицов Д.В., Рудакова Г.Я. Пути снижения эксплуатационных затрат мембранных установок для подготовки пи-

тьевой воды из подземных водоисточников // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 1. С. 4–13. DOI: 10.35776/MNP.2020.01.01

2. *Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W.* A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // *Desalination*. 2014. Vol. 354. Pp. 30–38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017
3. *Zhang P., Hu J., W. Li, H. Qi.* Research Progress of brackish water desalination by reverse osmosis // *Journal of Water Resource and Protection*. 2013. Vol. 5. Issue 3. Pp. 304–309. DOI: 10.4236/jwarp.2013.53031
4. *Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z.* Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // *Desalination*. 2017. Vol. 404. Pp. 224–229. DOI: 10.1016/j.desal.2016.11.019
5. *Ощепков М.С., Первов А.Г., Головесов В.А., Рудакова Г.Я., Камагуров С.Д., Ткаченко С.В. и др.* Применение флуоресцентного ингибитора для изучения процессов образования кристаллических осадков в установках обратного осмоса // *Мембраны и мембранные технологии*. 2019. Т. 9. № 4. С. 295–309. DOI: 10.1134/S2218117219040060
6. *Oh H.-J., Choung Y.-K., Lee S., Choi J.-S., Hwang T.-M., Kim J.H.* Scale formation in reverse osmosis desalination: model development // *Desalination*. 2009. Vol. 238. Issue 1–3. Pp. 333–346. DOI: 10.1016/j.desal.2008.10.005
7. *Френкель В.С., Первов А.Г., Андрианов А.П., Головесов В.А.* Investigation of antiscalant dosing influence on scaling process in reverse osmosis facilities and membrane surface adsorption // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 6. С. 722–733. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.722-733
8. *Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G.* The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO_3 scaling in reverse osmosis plants // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. Issue 48–49. Pp. 23162–23175. DOI: 10.1080/19443994.2015.1133874
9. *Li H., Hsieh M.-K., Chien S.-H., Monnell J.D., Dzombak D.A., Vidic R.D.* Control of mineral scale deposition in cooling systems using secondary-treated municipal wastewater // *Water Research*. 2011. Vol. 45. Issue 2. Pp. 748–760. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.052
10. *Ying W., Siebdrath N., Uhl W., Gitis V., Herzberg M.* New insights on early stages of RO membranes fouling during tertiary wastewater desalination // *Journal of Membrane Science*. 2014. Vol. 466. Pp. 26–35. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.04.027
11. *Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Lédion J. et al.* State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // *Desalination*. 2015. Vol. 356. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.014
12. *Li X., Hasson D., Shemer H.* Flow conditions affecting the induction period of CaSO_4 scaling on RO membranes // *Desalination*. 2018. Vol. 431. Pp. 119–125. DOI: 10.1016/j.desal.2017.08.014
13. *Ali S.A., Kazi I.W., Rahman F.* Synthesis and evaluation of phosphate-free antiscalants to control $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ scale formation in reverse osmosis desalination plants // *Desalination*. 2015. Vol. 357. Pp. 36–44. DOI: 10.1016/j.desal.2014.11.006
14. *Jiang S., Li Y., Ladewig B.P.* A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 567–583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235
15. *AL-Roomi Y.M., Hussain K.F.* Potential kinetic model for scaling and scale inhibition mechanism // *Desalination*. 2016. Vol. 393. Pp. 186–195. DOI: 10.1016/j.desal.2015.07.025
16. *Oshchepkov M., Popov K., Ryabova A., Redchuk A., Tkachenko S., Dikareva J. et al* Barite crystallization in presence of novel fluorescent-tagged antiscalants // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2019. Vol. 8. Issue 4. DOI: 10.17675/2305-6894-2019-8-4-12
17. *Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Ryabova A., Popov K.* Insight into the Mechanisms of Scale Inhibition: A Case Study of a Task-Specific Fluorescent-Tagged Scale Inhibitor Location on Gypsum Crystals // *ChemNanoMat*. 2019. Vol. 5. Issue 5. Pp. 586–592. DOI: 10.1002/cnma.201800660
18. *Shahid M.K., Pyo M., Choi Y.-G.* The operation of reverse osmosis system with CO_2 as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology // *Desalination*. 2018. Vol. 426. Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.020
19. *Wang C., Zhu D., Wang X.* Low-phosphorus maleic acid and sodium p-styrenesulfonate copolymer as calcium carbonate scale inhibitor // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 115. Issue 4. Pp. 2149–2155. DOI: 10.1002/app.31300
20. *Fane A.G.* Proc. Symposium on Characterization of Polymers with Surface, Lappeenranta. Finland, 1997. P. 51.
21. *Creber S.A., Vrouwenvelder J.S., van Loosdrecht M.C.M., Johns M.L.* Chemical cleaning of biofouling in reverse osmosis membranes evaluated using magnetic resonance imaging // *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 362. Issue 1–2. Pp. 202–210. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.06.052
22. *M’Nif A., Bouguecha S., Hamrouni B., Dhahbi M.* Coupling of membrane processes for brackish water desalination // *Desalination*. 2007. Vol. 203. Issue 1–3. Pp. 331–336. DOI: 10.1016/j.desal.2006.04.016
23. *Xu P., Bellona C., Drewes J.E.* Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: membrane autopsy results from pilot-scale investigations // *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 353. Issue 1–2. Pp. 111–121. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.02.037
24. *Shahid M.K., Choi Y.-G.* The comparative study for scale inhibition on surface of RO membranes in wastewater reclamation: CO_2 purging versus three

different antiscalants // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 546. Pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.087

25. Jeong S., Kim S.-J., Kim L.H., Shin M.S., Vigneswaran S., Nguyen T.V. et al. Foulant analysis of a reverse osmosis membrane used pretreated seawater // *Journal of Membrane Science*. 2013. Vol. 428. Pp. 434–444. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.11.007

26. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales // *Desalination and Water Treatment*. 2011. Vol. 29. Issue 1–3. Pp. 294–301. DOI: 10.5004/dwt.2011.2188

27. Miguel J., Garcia-Fayos B., Sancho M. Membrane Cleaning. Expanding Issues in Desalination, 2011. DOI: 10.5772/19760

28. Tow E.W., Lienhard J.H. Quantifying osmotic membrane fouling to enable comparisons across diverse processes // *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 511. Pp. 92–107. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.03.040

29. Herzberg M., Elimelech M. Biofouling of reverse osmosis membranes: Role of biofilm-enhanced osmotic pressure // *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 295. Issue 1–2. Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.02.024

Поступила в редакцию 14 мая 2020 г.

Принята в доработанном виде 23 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Алексеевич Головесов — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 905028, ORCID: 0000-0001-6162-045; voda@mgsu.ru;

Алексей Германович Первов — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 168126, ORCID: 0000-0002-7518-2342; voda@mgsu.ru;

Геннадий Дмитриевич Сухов — кандидат химических наук, ведущий специалист; АО «Научный центр “Малотоннажная химия”»; 107564, г. Москва, ул. Краснобогатyrская, д. 42, стр. 1; info@nc-mtc.ru;

Галина Яковлевна Рудакова — ведущий специалист; АО «Научный центр “Малотоннажная химия”»; 107564, г. Москва, ул. Краснобогатyrская, д. 42, стр. 1; РИНЦ ID: 545557, ORCID: 0000-0001-6498-5310; info@nc-mtc.ru.

REFERENCE

1. Pervov A., Golovesov V., Spitsov D., Rudakova G. Ways of reducing the operating costs of membrane units for the preparation of drinking water from underground water sources. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2020; 1:4-13. DOI: 10.35776/MNP.2020.01.01 (rus.).

2. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. *Desalination*. 2014; 354:30-38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017

3. Zhang P., Hu J., W. Li, H. Qi. Research Progress of brackish water desalination by reverse osmosis. *Journal of Water Resource and Protection*. 2013; 5(3):304-309. DOI: 10.4236/jwarp.2013.53031

4. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination. *Desalination*. 2017; 404:224-229. DOI: 10.1016/j.desal.2016.11.019

5. Oshchepkov M.S., Pervov A.G., Golovesov V.A., Rudakova G.Ya., Kamagurov S.D., Tkachenko S.V. et al. Use of a fluorescent antiscalant to investigate scaling of reverse osmosis membranes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2019; 9(4):295-309. DOI: 10.1134/S2218117219040060 (rus.).

6. Oh H.-J., Choung Y.-K., Lee S., Choi J.-S., Hwang T.-M., Kim J.H. Scale formation in reverse osmosis desalination: model development. *Desalination*. 2009; 238:1-3:333-346. DOI: 10.1016/j.desal.2008.10.005

7. Frenkel V.S., Pervov A.G., Andrianov A.P., Golovesov V.A. Investigation of antiscalant dosing influence on scaling process in reverse osmosis facilities and membrane surface adsorption. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(6):722-733. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.722-733

8. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO₃ scaling in reverse osmosis plants. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57:48-49:23162-23175. DOI: 10.1080/19443994.2015.1133874

9. Li H., Hsieh M.-K., Chien S.-H., Monnell J.D., Dzombak D.A., Vidic R.D. Control of mineral scale deposition in cooling systems using secondary-treated municipal wastewater. *Water Research*. 2011; 45(2):748-760. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.052

10. Ying W., Siebdrath N., Uhl W., Gitis V., Herzberg M. New insights on early stages of RO membranes fouling during tertiary wastewater desalination. *Journal*

of Membrane Science. 2014; 466:26-35. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.04.027

11. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Lédion J. et al. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article. *Desalination*. 2015; 356:47-55. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.014

12. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO₄ scaling on RO membranes. *Desalination*. 2018; 431:119-125. DOI: 10.1016/j.desal.2017.08.014

13. Ali S.A., Kazi I.W., Rahman F. Synthesis and evaluation of phosphate-free antiscalants to control CaSO₄·2H₂O scale formation in reverse osmosis desalination plants. *Desalination*. 2015; 357:36-44. DOI: 10.1016/j.desal.2014.11.006

14. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*. 2017; 595:567-583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235

15. AL-Roomi Y.M., Hussain K.F. Potential kinetic model for scaling and scale inhibition mechanism. *Desalination*. 2016; 393:186-195. DOI: 10.1016/j.desal.2015.07.025

16. Oshchepkov M., Popov K., Ryabova A., Redchuk A., Tkachenko S., Dikareva J. et al Barite crystallization in presence of novel fluorescent-tagged antiscalants. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2019; 8(4). DOI: 10.17675/2305-6894-2019-8-4-12

17. Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Ryabova A., Popov K. Insight into the Mechanisms of Scale Inhibition: A Case Study of a Task-Specific Fluorescent-Tagged Scale Inhibitor Location on Gypsum Crystals. *ChemNanoMat*. 2019; 5(5):586-592. DOI: 10.1002/cnma.201800660

18. Shahid M.K., Pyo M., Choi Y.-G. The operation of reverse osmosis system with CO₂ as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology. *Desalination*. 2018; 426:11-20. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.020

19. Wang C., Zhu D., Wang X. Low-phosphorus maleic acid and sodium p-styrenesulfonate copolymer as calcium carbonate scale inhibitor. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010; 115(4):2149-2155. DOI: 10.1002/app.31300

20. Fane A.G. *Proc. Symposium on Characterization of Polymers with Surface*, Lappeenranta. Finland, 1997; 51.

21. Creber S.A., Vrouwenvelder J.S., van Loosdrecht M.C.M., Johns M.L. Chemical cleaning of biofouling in reverse osmosis membranes evaluated using magnetic resonance imaging. *Journal of Membrane Science*. 2010; 362(1-2):202-210. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.06.052

22. M'Nif A., Bouguecha S., Hamrouni B., Dhahbi M. Coupling of membrane processes for brackish water desalination. *Desalination*. 2007; 203:1-3:331-336. DOI: 10.1016/j.desal.2006.04.016

23. Xu P., Bellona C., Drewes J.E. Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: membrane autopsy results from pilot-scale investigations. *Journal of Membrane Science*. 2010; 353(1-2):111-121. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.02.037

24. Shahid M.K., Choi Y.-G. The comparative study for scale inhibition on surface of RO membranes in wastewater reclamation: CO₂ purging versus three different antiscalants. *Journal of Membrane Science*. 2018; 546:61-69. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.087

25. Jeong S., Kim S.-J., Kim L.H., Shin M.S., Vigneswaran S., Nguyen T.V. et al. Foulant analysis of a reverse osmosis membrane used pretreated seawater. *Journal of Membrane Science*. 2013; 428:434-444. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.11.007

26. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales. *Desalination and Water Treatment*. 2011; 29(1-3):294-301. DOI: 10.5004/dwt.2011.2188

27. Miguel J., Garcia-Fayos B., Sancho M. *Membrane Cleaning*. Expanding Issues in Desalination, 2011. DOI: 10.5772/19760

28. Tow E.W., Lienhard J.H. Quantifying osmotic membrane fouling to enable comparisons across diverse processes. *Journal of Membrane Science*. 2016; 511:92-107. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.03.040

29. Herzberg M., Elimelech M. Biofouling of reverse osmosis membranes: Role of biofilm-enhanced osmotic pressure. *Journal of Membrane Science*. 2007; 295:1-2:11-20. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.02.024

Received May 14, 2020.

Adopted in a revised form on June 23, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: Vladimir A. Golovesov — post-graduate 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: 905028, ORCID: 0000-0001-6162-045; voda@mgsu.ru;

Alexey G. Pervov — Doctor of Technical Sciences, 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, ORCID: 0000-0002-7518-2342; voda@mgsu.ru;

Genadiy D. Suhov — Candidate of Chemical Sciences, head researcher; JSC "Fine Chemicals R&D Centre"; 42/1, Krasnobogatyrskaya st., Moscow, 107564, Russian Federation; info@nc-mtc.ru;

Galina Ya. Rudakova — head researcher; JSC "Fine Chemicals R&D Centre"; 42/1, Krasnobogatyrskaya st., Moscow, 107564, Russian Federation; ID RISC: 545557, ORCID: 0000-0001-6498-5310; info@nc-mtc.ru.

Особенности управления требованиями в сфере управления проектами в инжиниринговой компании полного цикла

В.В. Кудреватых

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ);
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Организационное развитие и практика внедрения системы управления проектами представляет особый интерес для инжиниринговых компаний, реализующих комплексные и многоэтапные проекты по проектированию и строительству объектов со сложной структурой, большим количеством стейкхолдеров и высокой степенью индивидуализации результатов. При этом часто возникает ситуация, когда процессы формализованы, т.е. разработан некоторый перечень нормативно-регламентных документов, определяющих участников проектной деятельности, их полномочия и ответственность, последовательность действий в процессах, шаблоны проектных документов и т.п., однако на практике требования этих документов не исполняются или исполняются не в полной мере. Проблема, которой посвящено данное исследование, обусловлена тем, что научные подходы к формированию системы управления проектами не предлагают универсального механизма контроля соблюдения требований к процессам управления проектами, установленным нормативно-регламентными документами организации, в которой создается эта система. Как следствие, в компаниях возникает сопротивление в отношении таких требований со стороны участников проектной деятельности. Предмет исследования — разработка инструмента контроля соблюдения требований нормативных документов в сфере проектного управления в инжиниринговой компании полного цикла.

Материалы и методы. Использованы методы моделирования и реинжиниринга процессов, статистического анализа, а также применена методология управления требованиями.

Результаты. Выявлены особенности проектного управления в инжиниринговых компаниях. Проанализированы результаты исследований в части адаптации методологии управления требованиями и качеством инжиниринговых проектов. Выполнено моделирование целевой схемы процесса контроля качества ведения проектов и проведения аудитов проектов. Сформулирован инструментальный для контроля качества ведения проектов и перечень данных показателей. Проведен анализ статистики нарушений показателей качества ведения проектов и причин их нарушения.

Выводы. Инструментарий контроля качества ведения проектов, предложенный в статье, позволяет проводить анализ соблюдения участниками проекта требований к процессам проектного управления, формализованным в компании, и повышать эффективность реализации проектов разного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление проектами, инжиниринг, управление требованиями, процессы проектного управления, управление качеством проекта, инжиниринговые проекты, строительные проекты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кудреватых В.В. Особенности управления требованиями в сфере управления проектами в инжиниринговой компании полного цикла // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1175–1190. DOI:10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190

Research of requirement management features in the field of project management in a full-cycle engineering company

Vladimir V. Kudrevatykh

National Research University Higher School of Economics (NRU HSE); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Organizational development and practice of the project management system implementation is of particular interest to engineering companies that implement complex and multi-stage design and construction projects having a complex structure, a large number of stakeholders and a high degree of result individualization. In this case, a situation often arises when processes are formalized, which means that a certain list of regulatory documents are developed in which project contributors, their activities, authority and responsibility, a sequence of actions to be performed, templates of project documents, etc. are defined, but in practice these requirements are not fulfilled or not fulfilled in full. The research problem is that approaches to the formation of a project management system do not offer a universal mechanism applied to monitor the compliance with project management requirements established by inhouse regulatory documents. As a result, project contributors resist such requirements in some companies. The subject of the study is the development of a tool designated for the monitoring of compliance with regulatory documents in the field of project management in a full-cycle engineering company.

Materials and methods. The method of process modeling and reengineering, statistical analysis, and the requirements management methodology were applied.

Results. Features of project management in engineering companies are outlined. Research results obtained in terms of adapting the requirement management methodology and engineering project quality are analyzed. The target scheme that applies to project management quality control and project audit processes was performed. The toolkit for the project management quality control was developed and a list of indicators was formulated. The analysis of statistics on cases of failure to comply with project management quality indicators and underlying reasons is conducted.

Conclusions. The project management quality control toolkit, proposed in the article, allows to analyze the compliance of project contributors with the requirements applied to project management processes formalized in a company and to increase the efficiency of various types of projects.

KEYWORDS: project management, engineering, requirements management, project management processes, project quality management, engineering projects, construction projects

FOR CITATION: Kudrevatykh V.V. Research of requirement management features in the field of project management in a full-cycle engineering company. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1175-1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Организационное развитие в современных условиях является обязательной группой процессов, без которой достижение конкурентных преимуществ и лидирующих позиций на рынке не представляется возможным. Организационное проектирование, моделирование, формализация и оптимизация бизнес-процессов, внедрение инструментов и механизмов управления проектами — все это отображает уровень зрелости организации и стадию жизненного цикла, на которой она сейчас находится. Особый интерес практика внедрения системы управления проектами представляет для инжиниринговых компаний, реализующих комплексные и многоэтапные проекты по проектированию и строительству объектов со сложной структурой, большим количеством стейкхолдеров и высокой степенью индивидуализации результатов. Многие инжиниринговые компании стремятся создать внутри компании высокоэффективную корпоративную систему управления проектами как путем создания проектного офиса и самостоятельной формализации, контроля процессов проектного управления, так и с привлечением сторонних экспертных и консалтинговых организаций, которые предлагают уже готовый продукт, который они адаптируют с учетом специфики деятельности организации и реализуемых проектов и затем встраивают в существующую систему бизнес-процессов. При этом часто возникает ситуация, когда процессы формализованы, т.е. разработан некоторый перечень нормативно-регламентных документов, определяющих участников проектной деятельности, их полномочия и ответственность, последовательность действий в процессах, шаблоны проектных документов и прочие аспекты деятельности, однако на практике требования этих документов не исполняются или исполняются не в полной мере, в особенности в инжиниринговых компаниях.

Таким образом, проблема данного исследования обусловлена тем, что научные подходы к формированию системы управления проектами не предлагают универсального механизма контроля соблюдения требований к процессам управления проектами, установленным нормативно-регламентными доку-

ментами организации, в которой создается эта система. Как следствие, в компаниях, адаптирующих результаты научных исследований в части методологии, а именно совокупности требований, методов и механизмов проектного и процессного управления, возникает сопротивление со стороны участников проектной деятельности, и требования не применяются на практике.

Соответственно, цель исследования — разработать инструментарий, позволяющий не только осуществлять контроль соблюдения требований к процессам проектного управления (качество ведения проектов) с учетом существующих научных исследований, но и вырабатывать рекомендации по развитию этих процессов с учетом специфики реализации инжиниринговых проектов.

Исследователи отмечают, что инжиниринговые проекты, в том числе строительные, как правило, связаны со значительными инвестициями, человеческими ресурсами и окружены различными заинтересованными сторонами, включая заказчика, подрядчиков и поставщиков, государственные органы и т.п. [1]. Каждая заинтересованная сторона предъявляет свои требования с точки зрения общей стоимости, своевременной поставки, технических характеристик, безопасности и надежности продукции проекта. Совокупность из этих требований называется требованиями к качеству проекта [1]. Система менеджмента качества сейчас широко внедряется в строительной отрасли, особенно в компаниях, реализующих так называемые мегапроекты [2].

Анализ различных подходов к оценке термина «качество проекта» позволяет дать ему следующее определение: степень, в которой неотъемлемые или присвоенные характеристики управления проектом и его продукт (продукты) отвечают требованиям, потребностям и спецификациям заинтересованных сторон [1, 2]. Исследование, проведенное Standish group, показало, что 78 % проектов провалились из-за неэффективного управления требованиями [2]. При этом отдельные исследования показали, что на качество проектного управления в строительной отрасли положительно влияют эффективное управление требованиями и внедрение системы менеджмента качества [2, 3]. Авторы отмечают, что реализация системы

управления качеством, в том числе ISO 9000, может повысить эффективность решения проблем, связанных с коммуникациями проекта, минимизировать потери и доработки проекта, лучше контролировать субподрядчиков и поставщиков, как следствие — повысить производительность и прибыльность проекта [3–5]. Отдельные исследования подтверждают эффективность внедрения системы управления требованиями при строительстве медицинских объектов, в том числе сложных зданий ядерной медицины на основе использования теории жизненного цикла строительного объекта [6].

Эффективность и оперативность внедрения систем управления качеством важны для улучшения производительности организаций [3]. Большинство результатов показало, что качество управления имеет четкую и значительную связь с качеством и эксплуатационными характеристиками проекта. Кроме того, исследования продемонстрировали, что качество может помочь компании получить конкурентные преимущества, реализовывать требования клиента при поставке продукции. Успех строительного проекта зависит от различных факторов, включая сложность проекта, устойчивость планирования проекта, отношений между участниками в проекте, технико-экономической оценки требуемых ресурсов и контроля стоимости проекта, а также соблюдения стратегии проекта на всех стадиях жизненного цикла строительного проекта от проектной идеи до его завершения [3, 7–9]. В ряде исследований делается акцент на влияние компетентности менеджера проекта и навыков ключевых участников проектов, рисков проекта и договорных отношений на успех строительного проекта [10–11].

Другие научные работы рассматривают возможность применения процессного подхода при реализации проектов. Нотации моделирования бизнес-процессов превратились в эффективный инструмент анализа и синтеза организационного управления. Если в организации одновременно ведутся операционная и проектная деятельности, то целесообразным считается проектирование системы управления проектами с учетом процессного подхода [12–14]. Реинжиниринг сам по себе является процессом, который, как и любой другой процесс, требует стратегического и точного плана для соответствующей реализации [15]. В качестве эффектов реинжиниринга процессов в строительстве авторами указывается формирование конкурентных преимуществ, наиболее полное удовлетворение запросов потребителей и формирование эффекта, расширяющего пределы развития, установленные устаревшими технологиями, методами и способами организации и управления [16].

В целом, публикации в зарубежных изданиях [17–20] подтверждают актуальность адаптации признанных в мировой практике систем управления качеством проекта и требованиями различных заинтересованных сторон к инжиниринговым компаниям. Кроме того, результаты исследований показывают, что внедрение систем управления качеством оказывает существенное влияние на удовлетворенность за-

казчика, что является жизненно важным критерием в строительных проектах [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе разработки инструмента контроля соблюдения требований внутренних нормативных документов в рассматриваемой инжиниринговой компании полного цикла применялся процессный подход, который позволил осуществить моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов компании, определить входы и выходы процессов, формализовать их в виде единой методологии, структурно состоящей из стандартов, регламентов и положений. Для формирования показателей эффективности процессов была применена методология управления требованиями. Для оценки динамики соблюдения показателей качества ведения проектов в работе был использован метод статистического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве кейса для разработки и апробации инструмента контроля соблюдения требований внутренней методологии была выбрана проектно-ориентированная российская инжиниринговая компания полного цикла, деятельность которой направлена на проектирование объектов, связанных с производством и применением продуктов разделения воздуха и криогенных жидкостей, их хранением, транспортированием и газификацией, оказанием услуг в области проектирования, поставки оборудования и материалов, строительного контроля, выполнения строительно-монтажных работ и т.д. В компании функционирует проектный офис, который осуществляет функции контроля реализации проектов, а также оказания консультационно-методологической поддержки участникам проектной деятельности. Принята следующая классификация внешних проектов компании:

- поставка оборудования и материалов — проекты, в содержании которых присутствует по крайней мере один из следующих видов работ и услуг или управление этими услугами и работами: работы по изготовлению и поставке оборудования и материалов, оказание услуг шефмонтажа; проведение пуско-наладочных работ; оказание услуг по обучению персонала заказчика и т.д.;
- строительство — проекты, в содержании которых присутствует по крайней мере один из следующих видов работ и услуг или управление этими услугами и работами: оценка стоимости строительства; оказание услуг генерального подрядчика; строительно-монтажные работы; оказание услуг по строительному контролю и т.д.;
- комплексные EPC (от англ. *engineering, procurement and construction*) проекты — проекты, объединяющее в своем содержании несколько типов проектов (проектирование, поставка оборудования и материалов, строительство).

Помимо вышеупомянутых проектов, реализуются внутренние проекты организационного развития. Штатная численность компании составляет 384 сотрудника. В компании одновременно реализуются 13 проектов, из них — десять внешних и три внутренних.

Методологическим подразделением проектного офиса компании была разработана система процессов проектного управления, формализованных в виде нормативно-регламентных документов разного уровня: стандартов, регламентов и положений. В стандартах системы менеджмента качества компании даны следующие определения данных видов документов:

- стандарт — документ, устанавливающий верхнеуровневые требования, правила, порядок выполнения, а также ответственность и взаимодействие должностных лиц при осуществлении вида деятельности или процесса, по значимости занимает верхнюю строчку в иерархии документов;

- регламент — документ, разграничивающий сферы деятельности, обязанности, права и ответственность между структурными подразделениями и отдельными работниками, а также упорядочивающий их взаимодействие. Цель регламента — детально раскрыть предметные области и процессы, упоминаемые в стандартах;

- положение — свод правил, касающихся одного или нескольких видов процессов. При разработке нормативных документов сотрудники проектного офиса адаптировали положения стандарта PMBOK (Свод знаний по управлению проектами (англ. *Project management body of knowledge*) международного Института управления проектами [22] с учетом специфики реализации инжиниринговых проектов.

В общей сложности было разработано 12 документов, среди которых три стандарта, три положения

и шесть регламентов. Структура документов представлена в табл. 1.

Для создания инструмента контроля соблюдения требований стандартов и регламентов проектного управления первоначально была сформулирована основная терминология. Степень, в которой руководители проектов и участники команд проектов соблюдали на практике требования нормативно-регламентных документов, была названа качеством ведения проекта. Качество ведения проекта — соответствие процессов управления проектом действующим нормативным документам компании и дополнительным требованиям заказчика по ведению проекта. Необходимо отметить, что объектами контроля стали не только внутренние правила и нормы, но и внешние требования заказчиков, зафиксированные в договорах, дополнительных соглашениях к ним, письмах и протоколах совещаний, а также дополнительные требования заказчиков по ведению проекта. Примером дополнительных требований может служить особый механизм коммуникаций между заказчиком и подрядчиками/поставщиками. Контроль качества ведения проектов осуществлялся по следующим аспектам:

- наличие необходимых документов по проекту;
- актуальность содержания информации по проекту;
- наличие и своевременное выполнение задач по управлению проектом.

Качество ведения проекта контролировалось на основе показателей качества ведения проекта — требований действующих нормативных документов компании и дополнительных требований заказчика, используемых для отслеживания и оценки качества

Табл. 1. Структура нормативных документов в сфере управления проектами

Table 1. Structure of regulatory documents in the field of project management

Наименование документа / Document name	Уровень документа / Document level
Предпроектная работа / Pre-project work	Стандарт / Standard
Управление проектами / Project management	Стандарт / Standard
Управление портфелем проектов / Project portfolio management	Стандарт / Standard
Организация коммуникаций в проектах Organization of communication in projects	Регламент Regulations
Бюджетирование в проектах / Budgeting in projects	Регламент / Regulations
Организация совещаний и контроль поручений проектов Organization of meetings and monitoring of project assignments	Регламент Regulations
Планирование и учет трудовых ресурсов проектов Project workforce planning and accounting	Регламент Regulations
Контроль качества ведения проектов / Project management quality control	Регламент / Regulations
Управление портфелем проектов / Project risk management	Регламент / Regulations
Премирование команд проектов / Awarding project teams	Положение / Provision
Календарно-сетевое планирование проектов Calendar-network project planning	Положение Provision
Экспертный совет / Expert council	Положение / Provision

ведения проекта. Показатель качества ведения проектов может принимать следующие значения:

- «да» — если показатель выполняется;
- «нет» — если показатель не выполняется или выполняется не в полной мере;
- «неприменимо» — если показатель неприменим для конкретного проекта.

Показатели качества ведения проектов могут быть критическими и некритическими. Критические показатели качества ведения проектов оказывают существенное влияние на ход реализации проекта и достижение целей проекта. Критичность показателей была определена руководителем проектного офиса и генеральным директором компании. Итоговый показатель качества ведения проекта — интегральный показатель, который складывается из суммы показателей качества ведения проектов. Необходимо уточнить, что показатель качества ведения проектов со значением «неприменимо» не учитывался при подсчете итогового показателя качества ведения проекта. Итоговые показатели качества ведения проекта складывались из суммы значений показателей качества ведения проектов и определялись по следующим правилам:

- невыполнение хотя бы одного критического показателя качества ведения проектов приводит к изменению итогового показателя качества проекта на статус «есть критические замечания к качеству»;
- невыполнение одного или нескольких некритических показателей качества ведения проектов приводит к изменению итогового показателя качества проекта на статус «есть замечания к качеству»;
- выполнение всех показателей качества ведения проектов приводит к изменению итогового показателя качества проекта на статус «без замечаний к качеству».

Для упрощения восприятия итоговых показателей использовалась система цветовых обозначений: красный — «есть критические замечания к качеству», желтый — «есть замечания к качеству», зеленый — «без замечаний к качеству».

Перечень показателей качества ведения проекта был сформирован посредством формирования системы управления требованиями нормативных документов в сфере управления проектами, указанных в табл. 1. В частности, были выявлены требования в рамках корпоративной системы управления проектами, имеющие ключевое значение для эффективности бизнес-процессов управления проектами. При этом на основе каждого нормативного документа формулировалось несколько показателей. Показатели качества ведения проекта были сгруппированы в зависимости от содержания по следующим направлениям:

- документы управления проектом;
- календарно-сетевой график проекта (КСГ);
- трудовые ресурсы проекта;
- бюджеты проекта;
- сетевые ресурсы проекта;
- еженедельная отчетность;
- контроль поручений проекта;

- риски проекта;
- коммуникации проекта;
- дополнительные требования заказчика проекта;
- аудит проекта.

Перечень показателей качества ведения проекта представлен следующим образом.

1. **«Статус документов управления проектом» (критический)** — отмечается соблюдение сроков разработки и утверждения устава проекта, плана управления проектом (ПУП), запроса на изменение проекта, итогового отчета проекта.

2. **«Создан актуальный КСГ проекта»** — в информационной системе управления проектами (ИСУП) Oracle Primavera для проекта должен быть создан актуальный КСГ проекта.

3. **«Создан базовый план проекта» (критический)** — в ИСУП для актуального КСГ проекта необходимо назначить базовый план, соответствующий параметрам утвержденного ПУП.

4. **«Актуальный КСГ соответствует требованиям нормативно-регламентных документов»** — КСГ должен содержать параметры стандартного КСГ, фазы проекта, контрольные точки 1 и 2-го уровней в виде вех. Все работы должны иметь предшественников и последователей, период между контрольными точками не должен превышать 30 дней.

5. **«Актуальный КСГ пересчитан на отчетную дату»** — актуальный КСГ пересчитан на отчетную дату в ИСУП.

6. **«Этапы договоров проекта актуализированы в ИСУП»** — платежные этапы, определенные в договорах проекта, заведены в ИСУП.

7. **«Плановые трудозатраты в ИСУП без перегрузов»** — максимальное превышение плановых трудозатрат отдельных ресурсов проекта в текущем месяце относительно нормы трудозатрат в этом месяце составляет не более 10 %.

8. **«Состав команды проекта актуален и соответствует ПУП»** — отношение количества новых ресурсов на этапе проекта по отношению к количеству ресурсов, указанных для этапа в ПУП в текущем месяце, составляет не более 20 %.

9. **«Соответствие плановых и фактических трудозатрат ресурсов проекта»** — отношение фактической загрузки отдельного ресурса проекта в текущем месяце к плановой загрузке ресурса на период с начала текущего месяца до отчетной даты составляет от 80 до 120 %.

10. **«Бюджеты проекта выложены на сетевом ресурсе проекта»** — все виды бюджетов проекта, в том числе базовые и актуальные, выложены на сетевом ресурсе проекта.

11. **«План-факт анализ по бюджету подготовлен на отчетную дату»** — план-факт анализ по бюджету подготовлен на отчетную дату и соответствует требованиям нормативных документов.

12. **«Сетевой архив проекта создан»** — создан сетевой архив проекта, определены права доступа.

13. **«Документы, подтверждающие выполнение КГТ, выложены на сетевом ресурсе проек-**

та» — в папке проекта размещены все документы, подтверждающие выполнение работ проекта и контрольных точек.

14. **«Сканы договоров и дополнительных соглашений находятся на сетевом ресурсе проекта»** — на сетевом ресурсе проекта должны быть размещены все договоры проекта и дополнительные соглашения к ним в соответствии с планом коммуникаций.

15. **«Структура сетевого ресурса проекта соответствует плану коммуникаций»** — текущая структура сетевого ресурса проекта должна соответствовать плану коммуникаций.

16. **«Еженедельный отчет подготовлен»** — еженедельный отчет за предыдущий отчетный период был подготовлен и направлен в адрес руководства.

17. **«Актуальный реестр протоколов и поручений»** — реестр протоколов и поручений должен актуализироваться в соответствии с утвержденной периодичностью.

18. **«Протоколы совещаний выложены на сетевом ресурсе проекта»** — электронные копии утвержденных протоколов по проекту должны быть размещены в сетевой папке проекта.

19. **«Реестр рисков находится на сетевом ресурсе проекта»** — актуальный реестр рисков проекта должен быть размещен в сетевой папке проекта с доступом для участников команды проекта и МКП.

20. **«Риски оценены, определены мероприятия по работе с рисками»** — для всех рисков проекта должна быть проведена их оценка, риски упорядочены на карте рисков, определены мероприятия по работе с рисками.

21. **«Реестр рисков актуализируется по завершению контрольных точек»** — реестр рисков должен актуализироваться по результатам завершения контрольных точек 1 и 2-го уровней.

22. **«План коммуникаций разработан и утвержден»** — разработан и утвержден план коммуникаций проекта.

23. **«Создан бумажный архив проекта»** — руководителем проекта организован бумажный архив проекта.

24. **«Специальная отчетность для заказчика подготовлена и соответствует условиям договора»** — специальная отчетность для заказчика должна быть оформлена в соответствии с условиями договора и предоставлена ему в установленный срок.

25. **«Специальные требования к коммуникациям соблюдены»** — текущий порядок коммуникаций с заказчиком соответствует условиям договора.

26. **«Замечания по итогам аудита проекта устранены»** — замечания по итогам аудита проекта, зафиксированные в отчете о проведении аудита, должны быть устранены в установленный срок.

Контроль качества в организации осуществлялся посредством двух механизмов: еженедельного мониторинга качества ведения проектов и аудитов качества ведения проектов. Еженедельный мониторинг качества ведения проектов включает в себя процесс подготовки отчета о качестве ведения проектов. От-

чет по качеству ведения проектов (далее — отчет) — еженедельный отчет, содержащий информацию о соответствии проекта показателям качества ведения проектов. Отчет содержит показатели качества ведения проектов, пояснения к данным показателям, которые раскрывают их содержание, а также итоговые показатели качества ведения проекта.

Контроль качества ведения проектов осуществлялся менеджерами по контролю проектов, которые еженедельно заполняли отчет: осуществляли проверку соответствия проектов показателям качества ведения проектов, при необходимости запрашивали информацию у руководителей проектов, отмечали наличие замечаний к качеству. В случае если руководители проектов не могли устранить замечания в связи с отсутствием необходимых полномочий, то они эскалировали данную проблему на уровень руководителей компании.

В случае нарушения критических показателей качества ведения проектов, наличия критических отклонений фактических значений по срокам, ресурсам и бюджету проекта от плановых, зафиксированных в плане управления проектом инициировались аудиты качества ведения проектов (далее — аудиты). Для проведения аудита определяется цель аудита, состав комиссии по проведению аудита проекта, объект аудита, сроки проведения аудита. Также разрабатывался план проведения аудита, который включал в себя перечень мероприятий со сроками выполнения и составом участников каждого мероприятия. План мероприятий формировался в соответствии с целями аудита и обязательно содержал следующие мероприятия:

- сбор и анализ материалов проекта;
- подготовку и согласование отчета о проведении аудита.

Комиссия аудита в соответствии с целями аудита осуществляла анализ следующих материалов проекта:

- документов управления проектом (устава проекта, плана управления проектом, запросов на изменения, плана коммуникаций);
- актуального графика проекта;
- реестра поручений и реестра протоколов по проекту;

• документов, подтверждающих выполнение работ и достижение контрольных точек по проекту;

- архива проекта;
- иной информации.

Комиссия аудита осуществляет мероприятия в соответствии с планом и целями аудита, определяет замечания к проекту, их существенность, последствия, рекомендации по устранению замечаний и общие выводы по результатам аудита. По результатам проведения аудита готовился и утверждался отчет о проведении аудита, а менеджер по контролю проектов отслеживал выполнение поручений, зафиксированных в отчете. Целевая схема процессов еженедельного мониторинга качества ведения проектов и проведения аудитов проектов представлена на рис. 1. На схеме показаны участники, шаги, документы процесса, а также входы и выходы процесса.

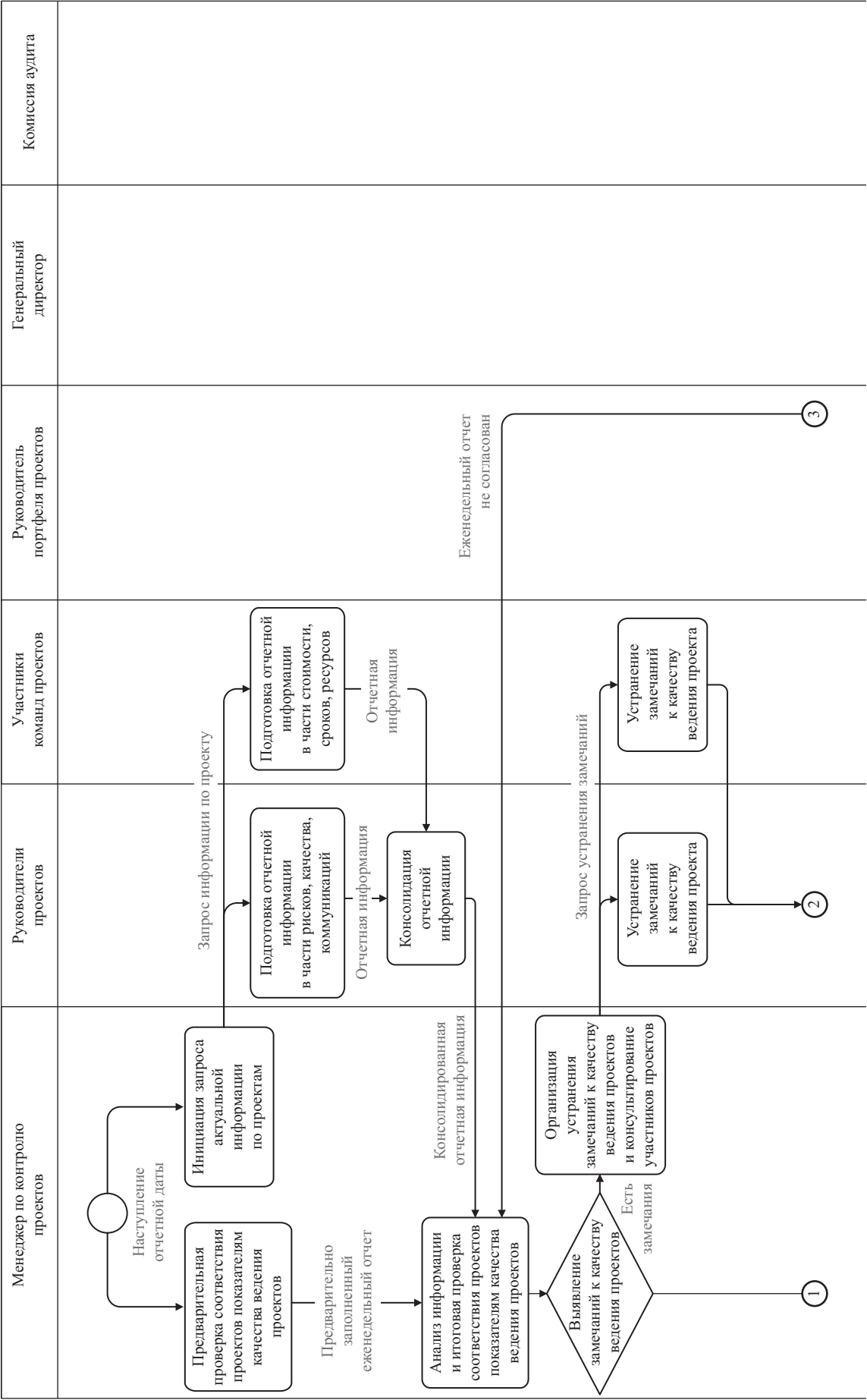


Рис. 1. Целевая схема процессов еженедельного мониторинга качества ведения проектов и проведения аудитов проектов

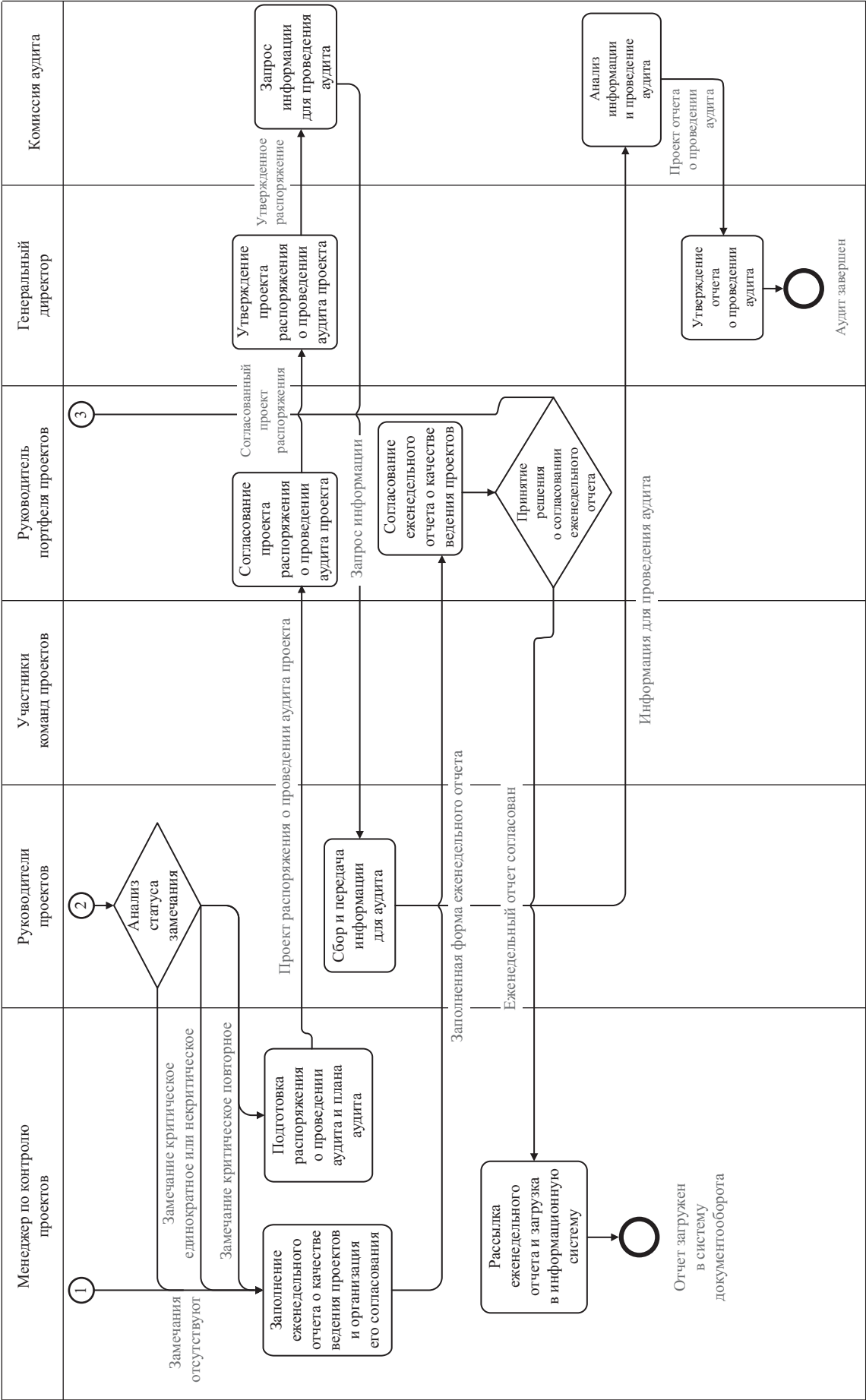


Рис. 1. Целевая схема процессов еженедельного мониторинга качества ведения проектов и проведения аудитов проектов

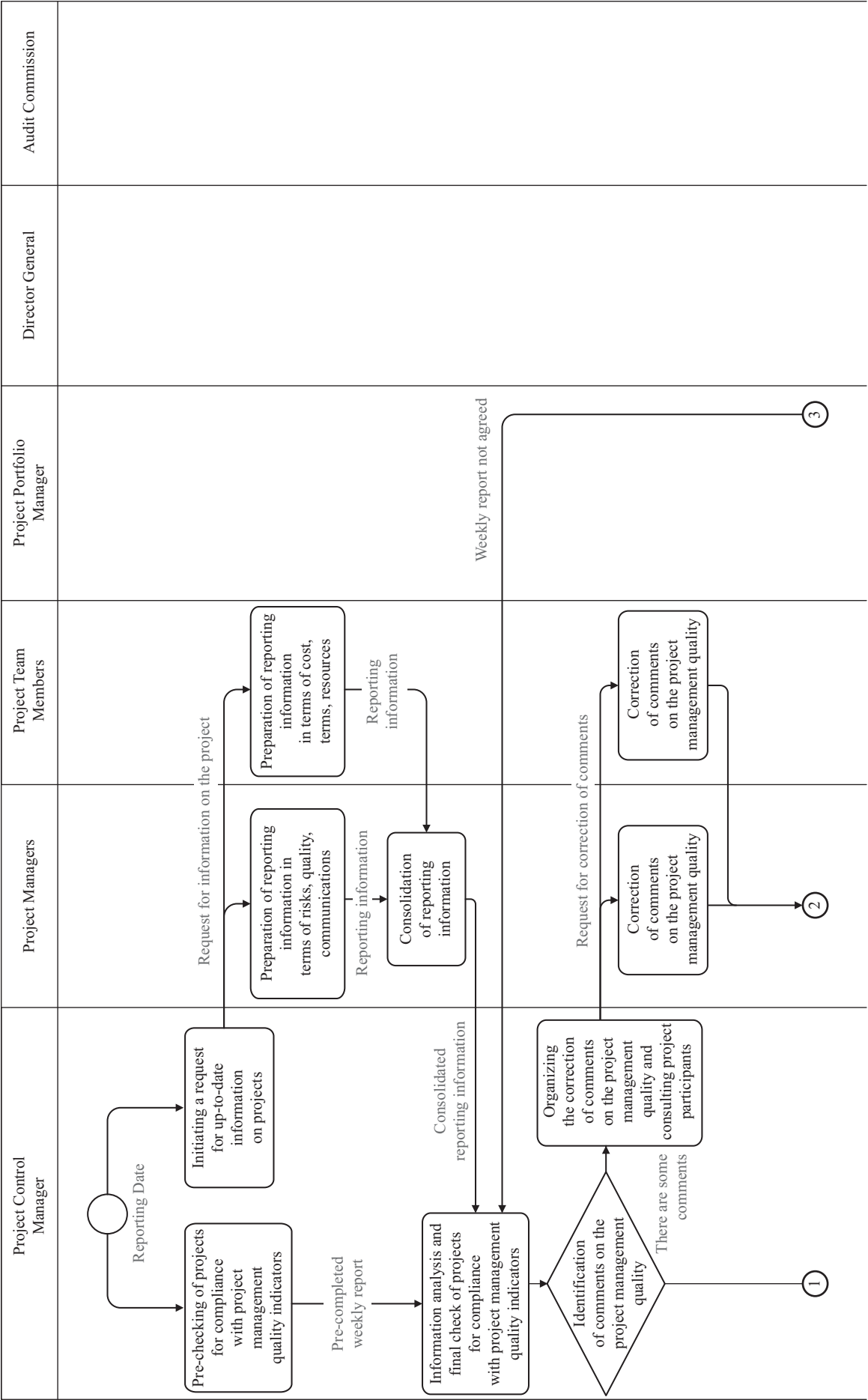


Fig. 1. Target scheme of the weekly monitoring processes for the quality of project management and project audits

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15. Выпуск 8, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 8, 2020

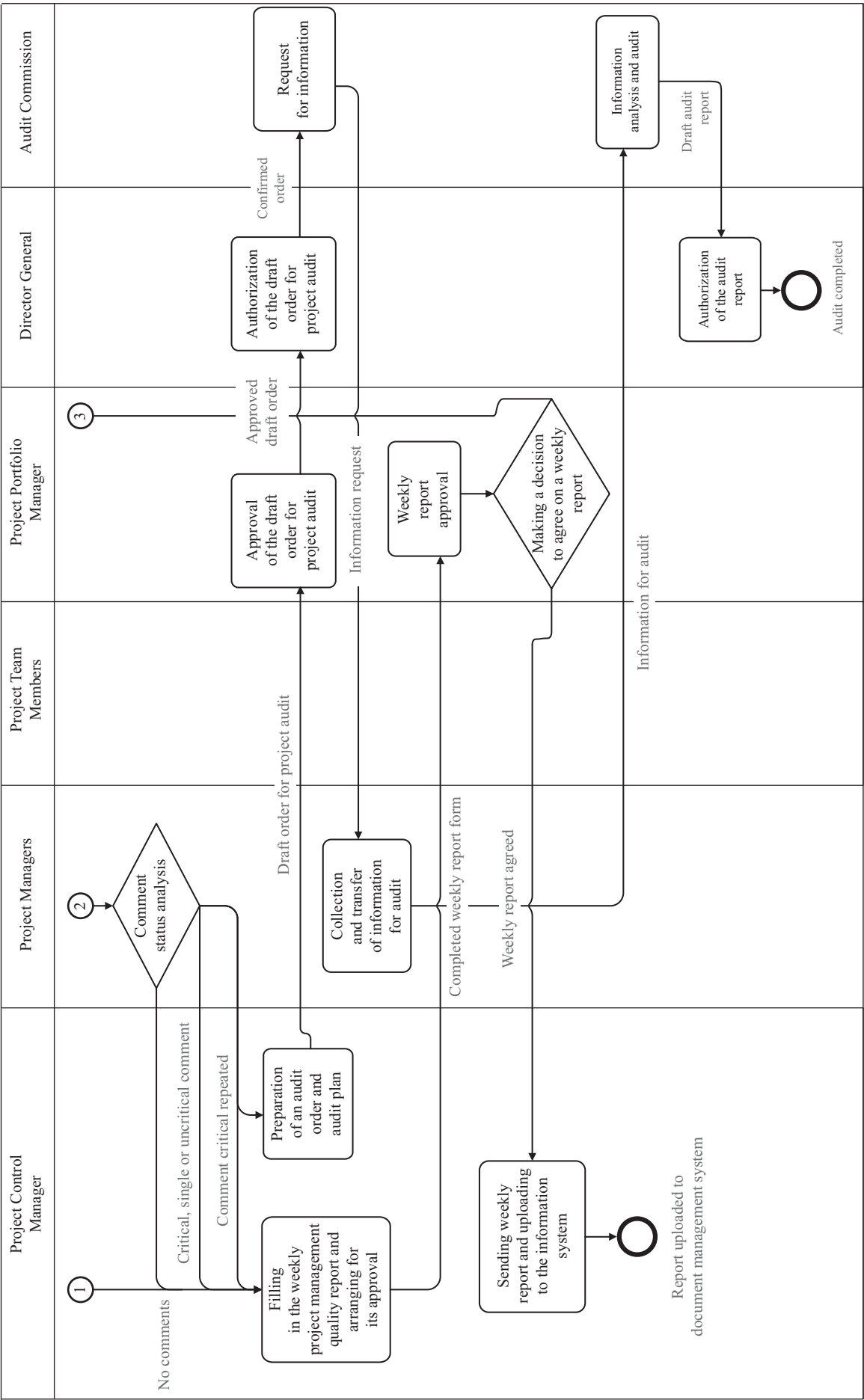


Fig. 1. Target scheme of the weekly monitoring processes for the quality of project management and project audits

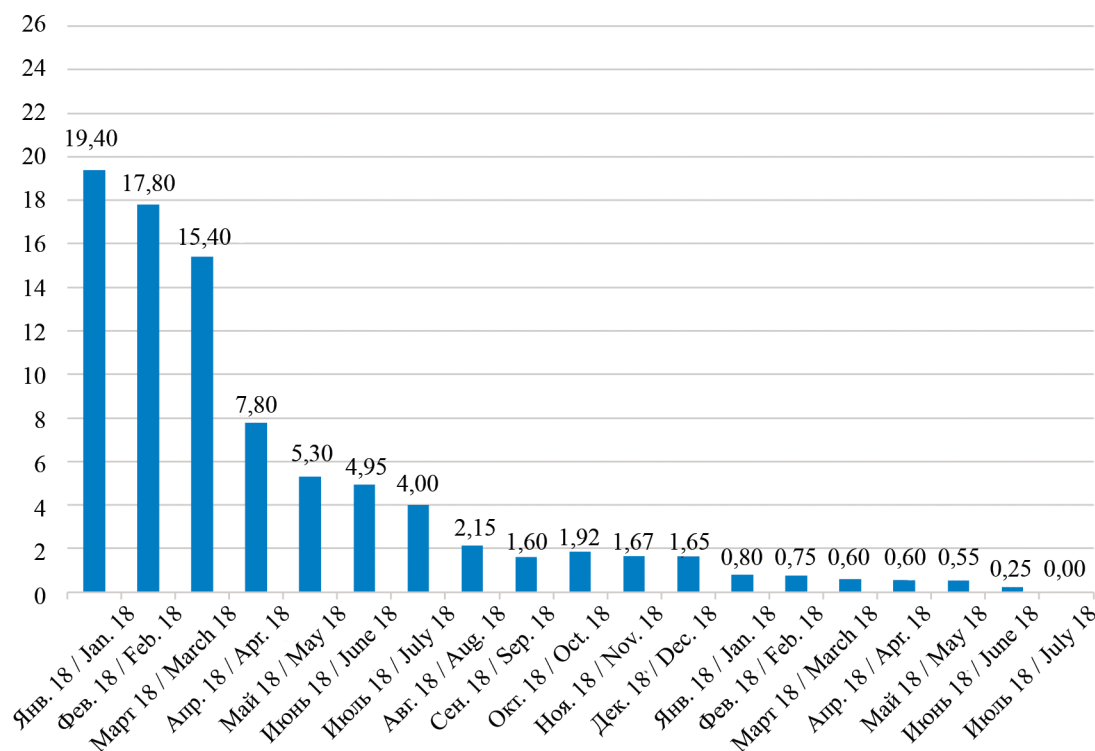


Рис. 2. Статистика нарушений показателей качества ведения проектов типа «проектирование»

Fig. 2. Statistics of project management quality indicator violations of "Design" type

Для оценки эффективности процесса контроля качества необходимо обратиться к статистике нарушений показателей качества за период с января 2018 г. по июль 2019 г. по четырем типам проектов: проектирование, поставка, ЕРС и строительство. Значения соответствуют среднему значению количества нарушений 26 показателей качества за выбранный период времени проектами одного типа (проектирование, поставка, ЕРС, строительство).

На рис. 2 мы видим, что проекты данного типа смогли выйти на соблюдение 100 % показателей лишь в июле 2019 г. При этом за все время наблюдения, в особенности с января по июнь 2018 г., присутствовала устойчивая тенденция к нарушению значительного числа показателей качества. Более того, в отдельных проектах отмечалось длительное несоблюдение критических показателей качества с января 2018 г. вплоть до января 2019 г. Среди причин нарушений в этих проектах: недостаточность опыта управления проектами у главных инженеров проектов, выполнение проектов в условиях отсутствия исходных данных от заказчика, отсутствие механизма работы с заинтересованными сторонами на проекте, неэффективные коммуникации с заказчиком, низкий уровень работы с рисками проекта. В связи с этим проекты типа «проектирование» стали наиболее проблемными с точки зрения выполнения требований нормативных документов в сфере управления проектами, что, в свою очередь, отражалось на вы-

полнении обязательств перед заказчиком по срокам и объемам выполнения работ в соответствии с контрактом. Несмотря на вышесказанное, с начала 2019 г. тенденция значительно улучшилась во многом благодаря постоянной методологической поддержке и обучению руководителей проектов, а также за счет оптимизации ряда процессов, связанных с разработкой проектной и рабочей документации.

Из рис. 3 следует, что проекты по поставке оборудования и материалов показали наилучшие результаты среди других типов проектов, где уже через 5 месяцев соблюдались все показатели качества ведения проекта. Такие успехи обусловлены эффективными коммуникациями с заказчиком и подрядчиками проекта, включая многоуровневую систему отчетности по статусу каждого направления работ проекта, регулярную оценку рисков и реализацию мероприятий по работе с ними, высокий уровень вовлеченности руководителя проекта в развитие системы управления проектами в компании. Критические показатели в данных проектах не нарушались, а некритические показатели нарушались с января по апрель 2018 г., а также в августе и ноябре 2018 г. Последние упомянутые нарушения были обусловлены сменой руководителей проектов и существенным изменением условий контракта в части объемов поставляемого оборудования.

Рис. 4 показывает, что комплексные ЕРС проекты уже к апрелю 2018 г. достигли низких значе-

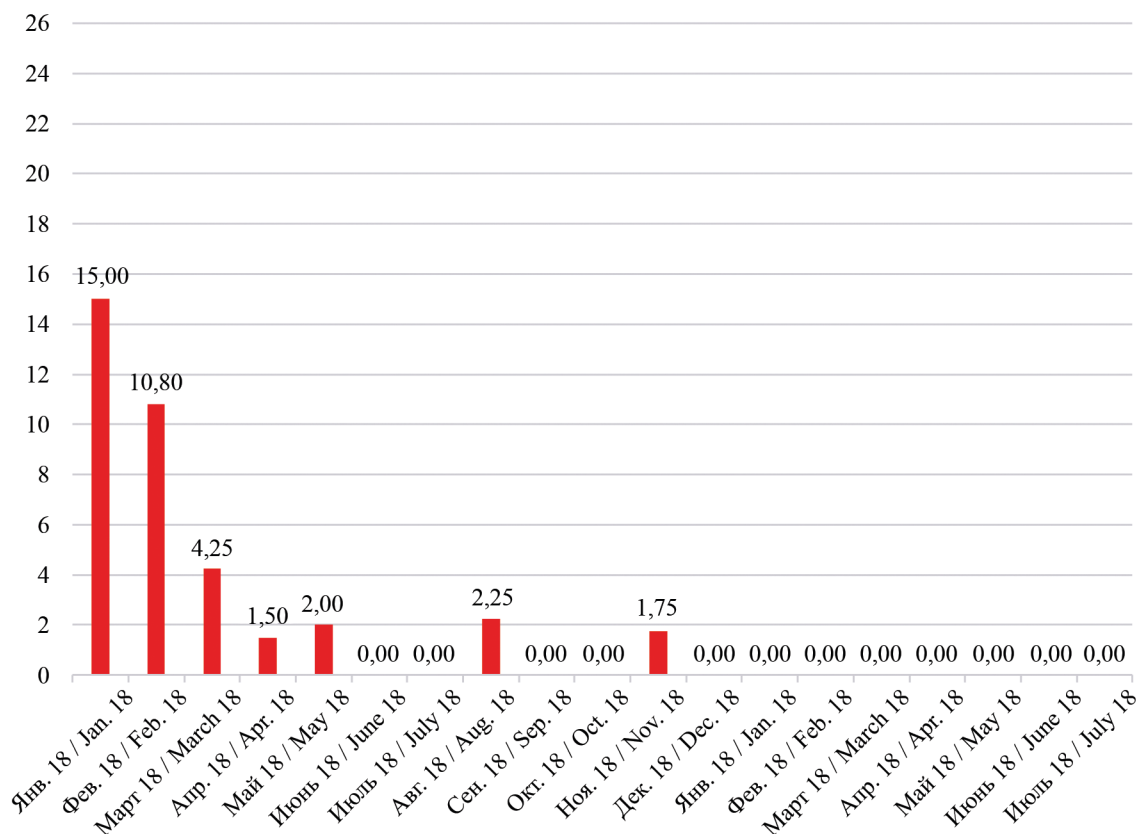


Рис. 3. Статистика нарушений показателей качества ведения проектов типа «поставка»

Fig. 3. Statistics of project management quality indicator violations of "Delivery" type

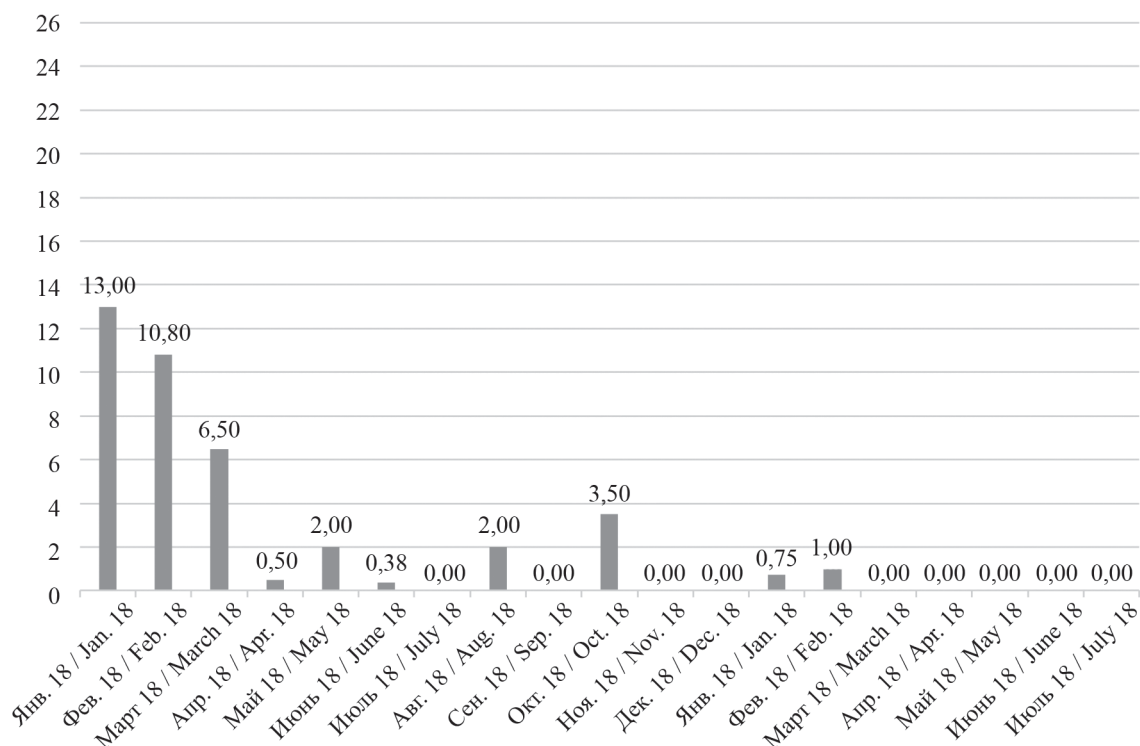


Рис. 4. Статистика нарушений показателей качества ведения проектов типа «EPC»

Fig. 4. Statistics of project management quality indicator violations of "Engineering, Procurement, Construction" type

ний нарушений показателей качества. Позитивная динамика обусловлена значительным опытом руководителей проектов в реализации ЕРС проектов, выстроенной системе внутренних процедур в проектах, наличием связанной системы процессов проектирования, поставки и строительства, широким спектром привлеченных специалистов высокой квалификации к реализации проекта, отлаженной системой контроля за работами на площадке, а также сбором фактических данных о выполненных работах. Несмотря на низкий уровень нарушений в целом, ЕРС проекты в период с мая по июль 2018 г. не удовлетворяли требованиям критических показателей качества проектов. Проблемы были связаны в том числе с переходом проекта с фазы «проектирование» в фазу «поставка» и необходимостью оперативного изменения организационной структуры проекта, а также изменением подрядчиков.

Наконец, на рис. 5 представлена статистика по проектам типа «строительство». Аналогично ЕРС проектам строительные проекты к апрелю 2018 г. достигли низких значений нарушений показателей качества, однако впоследствии имели место не критические нарушения, а в июне 2018 г. не соблюдались критические показатели качества ведения проекта. Среди проблем, повлиявших на соблюдения показателей качества, следует отметить затянутый процесс принятия решений у заказчика, а также нарушение сроков выполнения контрольных точек проекта командой проекта. В то же самое время позитивная динамика строительных

проектов в сфере управления проектом во многом обусловлена причинами, аналогичными для ЕРС проектов, — ориентацией компании на развитие системы управления именно такими типами сложных, комплексных проектов.

ВЫВОДЫ

С целью совершенствования качества управления проектами в инжиниринговой компании целесообразно применять процессный подход с элементами концепции управления требованиями.

На основе разработанных нормативных документов в сфере управления проектами были сформированы показатели качества ведения проекта, а также схема процесса контроля этих показателей и проведения аудитов проектов. С учетом статистики нарушений показателей качества ведения проекта, приведенной в настоящей статье, мы можем утверждать, что моделирование и формализация данного процесса за 19 месяцев позволили достичь 100 % соблюдения показателей качества во всех девяти проектах. В целом внедрение системы контроля качества ведения проектов на момент июля 2019 г. позволило в среднем по всем проектам компании сократить отклонение фактических сроков реализации проектов от плановых на 7,4 % по сравнению с январем 2018 г., согласно экспертным оценкам 36 сотрудников компании, участвующих в реализации проектов.

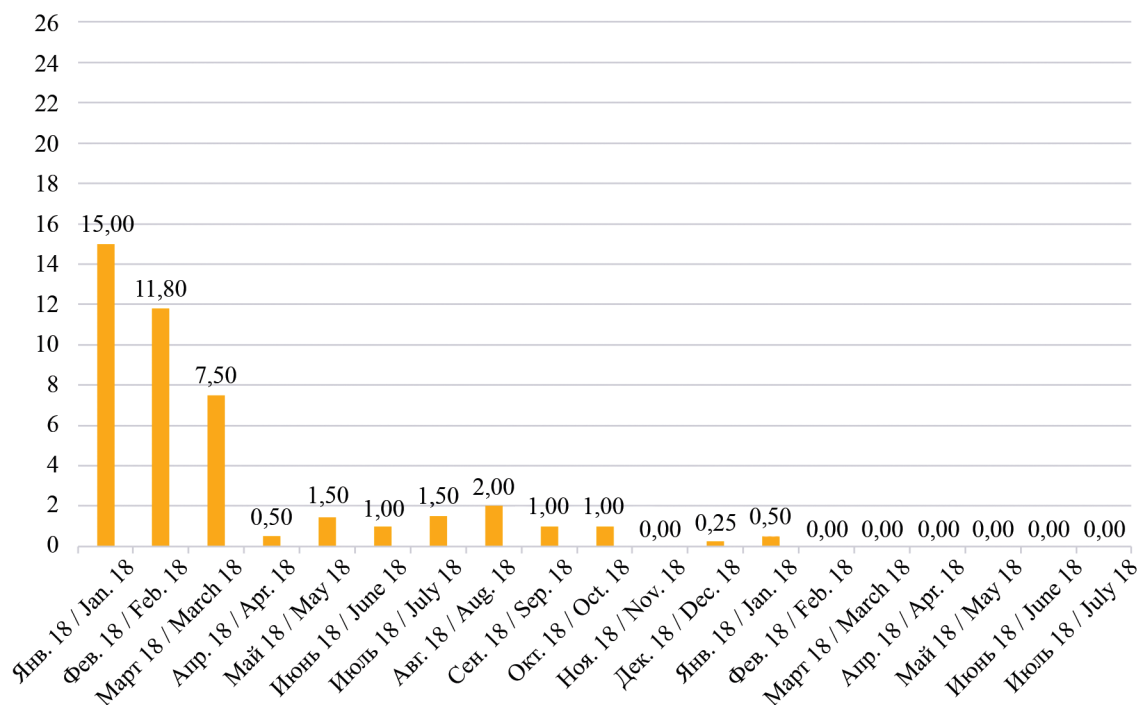


Рис. 5. Статистика нарушений показателей качества ведения проектов типа «строительство»

Fig. 5. Statistics of project management quality indicator violations of "Construction" type

Более того, в компании на ежемесячной основе проводится анализ систематического нарушения показателей качества ведения проектов, выявляются причины отклонений, формируются предложения по улучшению качества ведения проектов. По результатам такого анализа определяются корректирующие действия, в том числе выявляется необходимость корректировки показателей качества ведения проектов. С учетом анализа динамики нарушений показателей, а также изменений внешней и внутренней среды функционирования компании осуществляется актуализация показателей качества ведения проектов. Также целесообразно внедрять

новые показатели в зависимости от появления требований новых нормативно-регламентных документов или появления новых инжиниринговых проектов в компании.

Дальнейшее исследование рассматриваемой в статье проблемы целесообразно сконцентрировать на применении предложенного инструмента контроля в других компаниях, реализующих инжиниринговые, в том числе строительные, проекты, а также оценить влияние частоты нарушения показателей качества ведения проектов на соблюдение сроков реализации проектов и бюджетов проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zafarani E. Project quality management approaches: A comparative evaluation of international standards // 2nd International Conference on Construction and Project Management IPEDR. 2011. Vol. 15. Pp. 37–43. URL: <http://www.ipedr.com/vol15/8-ICCP-M2011A00014.pdf>
2. Mohapatra S. Requirement management-controlling quality at the upstream in commercial software project management // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 3. Pp. 8203–8219.
3. Leong T.K., Zakuan N., Saman M.Z.M., Ariff M.S.M., Tan C.S. Using project performance to measure effectiveness of quality management system maintenance and practices in construction industry // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2014/591361
4. Ahmad M.F., Yusof S.M., Yusof N.M. Comparative Study of Quality Practices Between Japanese and Non-Japanese Based Electrical and Electronics Companies in Malaysia: A Survey // Jurnal Teknologi. 2007. Vol. 47. Issue 1. DOI: 10.11113/jt.v47.255
5. Din S., Abd-Hamid Z., Bryde D. ISO 9000 certification and construction project performance: The Malaysian experience // International Journal of Project Management. 2011. Vol. 29. Issue 8. Pp. 1044–1056. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.11.001
6. Дорогань И.А. Управление требованиями при строительстве зданий медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 1046–1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056
7. Гусакова Е.А. Направления прогнозного анализа жизненного цикла проектов девелопмента недвижимости // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 9. С. 1196–1204. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1196-1204
8. Pakseresht A., Asgari G. Determining the critical success factors in construction projects: AHP approach // Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business. 2012. Vol. 4. Issue 8. Pp. 383–393.
9. Fernández-Sánchez G., Rodríguez-López F. A Methodology to Identify Sustainability Indicators in Construction Project Management-Application to Infrastructure Projects in Spain // Ecological Indicators. 2010. Vol. 10. Issue 6. Pp. 1193–1201. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.04.009
10. Dobrovolskienė N., Tamošiūnienė R. An index to measure sustainability of a business project in the construction industry: Lithuanian case // Sustainability. 2016. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.3390/su8010014
11. Yu M., Zhu F., Yang X., Wang L., Sun X. Integrating sustainability into construction engineering projects: Perspective of sustainable project planning // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 784. DOI: 10.3390/SU10030784
12. Абрамов И.В., Алгазинов Э.К., Матвеев М.Г. Процессный подход к построению системы проектного управления // Прикладная информатика. 2014. № 1 (49). С. 15–22.
13. Alaloul W., Liew M., Zawawi N. A framework for coordination process into construction projects // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 66. P. 00079. DOI: 10.1051/mateconf/20166600079
14. Wynn M.T., Ouyang C., Low W.Z., Kanjanabootra S., Harfield T., Kenley R. A process-oriented approach to supporting Off-site Manufacture in construction projects // International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB). Netherlands, 2013. Pp. 13–25.
15. Galić M., Završki I., Dolaček-Alduk Z. Reengineering the construction companies in time of the recession // 11th International Conference Organization, Technology and Management in Construction. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.1172.8080
16. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А. Реинжиниринг объектов капитального строительства и реинжиниринг технологических процессов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1321–1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330

17. Esmaeili B., Franz B., Molenaar K.R., Leicht R.M., Messner J.I. A review of critical success factors and performance metrics on construction projects // *Proceedings of the 4th Construction Specialty Conference*. 2013.

18. Elbashir M. Quality management in construction projects // *PM World Journal*. 2018. Vol. 7. Issue 2. Pp. 1–10.

19. Razzak A. Quality Management in Construction Projects. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 537 p. DOI: 10.1201/b10351

20. Golob K., Bastič M., Pšunder I. Influence of project and marketing management on delays, penalties, and project quality in Slovene organizations in the construction industry // *Journal of Management in Engineering*. 2013. Vol. 29. Issue 4. Pp. 495–502. DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000146

21. Neyestani B. Effectiveness of quality management system (QMS) on construction projects. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.290272

22. PMBoK Guide 6. Pennsylvania : Project Management Institute, 2017. 756 p.

Поступила в редакцию 10 мая 2020 г.

Принята в доработанном виде 1 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: Владимир Владимирович Кудреватых — аспирант кафедры управления проектами; Научный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ); 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20; v.kudrevatyh@mail.ru.

REFERENCES

1. Zafarani E. Project quality management approaches: A comparative evaluation of international standards. *2nd International Conference on Construction and Project Management IPEDR*. 2011; 15:37–43. URL: <http://www.ipedr.com/vol15/8-ICCP-M2011A00014.pdf>

2. Mohapatra S. Requirement management-controlling quality at the upstream in commercial software project management. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(3):8203–8219.

3. Leong T.K., Zakuan N., Saman M.Z.M., Ariff M.S.M., Tan C.S. Using project performance to measure effectiveness of quality management system maintenance and practices in construction industry. *The Scientific World Journal*. 2014; 2014:1–9. DOI: 10.1155/2014/591361

4. Ahmad M.F., Yusof S.M., Yusof N.M. Comparative Study of Quality Practices Between Japanese and Non-Japanese Based Electrical and Electronics Companies in Malaysia: A Survey. *Jurnal Teknologi*. 2007; 47(1). DOI: 10.11113/jt.v47.255

5. Din S., Abd-Hamid Z., Bryde D. ISO 9000 certification and construction project performance: The Malaysian experience. *International Journal of Project Management*. 2011; 29(8):1044–1056. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.11.001

6. Dorogan I.A. Requirements management in the medical building construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(8):1046–1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056 (rus.).

7. Gusakova E.A. Directions for the forecast analysis of the life cycle of real estate development projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(9):1196–1204. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1196-1204 (rus.).

8. Pakseresht A., Asgari G. Determining the critical success factors in construction projects: AHP approach. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*. 2012; 4(8):383–393.

9. Fernández-Sánchez G., Rodríguez-López F. A Methodology to Identify Sustainability Indicators in Construction Project Management-Application to Infrastructure Projects in Spain. *Ecological Indicators*. 2010; 10(6):1193–1201. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.04.009

10. Dobrovolskienė N., Tamošiūnienė R. An index to measure sustainability of a business project in the construction industry: Lithuanian case. *Sustainability*. 2016; 8(1):1–14. DOI: 10.3390/su8010014

11. Yu M., Zhu F., Yang X., Wang L., Sun X. Integrating sustainability into construction engineering projects: Perspective of sustainable project planning. *Sustainability*. 2018; 10(3):784. DOI: 10.3390/SU10030784

12. Abramov I., Algazinov E., Matveev M. The process approach to project management system construction. *Applied Informatics*. 2014; 1(49): 15–22. (rus.).

13. Alaloul W., Liew M., Zawawi N. A framework for coordination process into construction projects. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 66:00079. DOI: 10.1051/mateconf/20166600079

14. Wynn M.T., Ouyang C., Low W.Z., Kanjanabootra S., Harfield T., Kenley R. A process-oriented approach to supporting Off-site Manufacture in construction projects. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)*. Netherlands, 2013; 13–25.

15. Galić M., Završki I., Dolaček-Alduk Z. Re-engineering the construction companies in time of the recession. *11th International Conference Organization, Technology and Management in Construction*. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.1172.8080.

16. Sborshikov S.B., Maslova L.A. Reengineering of capital construction objects and reengineering of technological processes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(10):1321-1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330 (rus.).

17. Esmacili B., Franz B., Molenaar K.R., Leicht R.M., Messner J.I. A review of critical success factors and performance metrics on construction projects. *Proceedings of the 4th Construction Specialty Conference*. 2013.

18. Elbashir M. Quality management in construction projects. *PM World Journal*. 2018; 7(2):1-10.

19. Razzak A. *Quality Management in Construction Projects*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011; 537. DOI: 10.1201/b10351

20. Golob K., Bastič M., Pšunder I. Influence of project and marketing management on delays, penalties, and project quality in Slovene organizations in the construction industry. *Journal of Management in Engineering*. 2013; 29(4):495-502. DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000146

21. Neyestani B. *Effectiveness of quality management system (QMS) on construction projects*. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.290272

22. *PMBok Guide 6*. Pennsylvania, Project Management Institute Publ., 2017; 756.

Received May 10, 2020.

Adopted in a revised form on June 1, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

BIONOTES: Vladimir V. Kudrevatykh — postgraduate student of Department of project management; **National Research University Higher School of Economics (NRU HSE)**; 20 Myasnitskaya st., 101000, Moscow, Russian Federation; v.kudrevatykh@mail.ru.

Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками

Е.А. Гусакова, А.Н. Овчинников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ развития и применения BIM-технологий в российском строительстве показал отсутствие системного подхода и единых концепций отраслевых технологий информационного моделирования. В сложившихся условиях актуальна стратегическая цель — цифровая трансформация отрасли на единой федеральной информационной платформе, а также новые задачи разработки долгосрочных моделей организации и управления полным жизненным циклом объектов капитального строительства.

Материалы и методы. В статье рассмотрен функционал и возможности цифровых технологий, в том числе облачных технологий и больших данных, промышленного интернета вещей и блокчейна с позиций прикладных перспектив и информационной специфики задач организации подсистем, участников и стадий проекта в строительстве.

Результаты. Структура информационной модели организации и управления жизненным циклом объекта капитального строительства представлена как совокупность взаимосвязанных информационных потоков последовательных стадий, подсистем и участников проекта. Показано, что традиционные принципы организации и управления сдерживают накопленный мощный потенциал цифровой трансформации, поэтому разработка архитектуры единой отраслевой платформы BIM требует новых производственных концепций организации и управления информационными потоками проекта. Предложено воплощение концепции и модели управления — виртуальное проектное предприятие, которое позволяет организовать взаимодействие участников проекта капитального строительства и управление его жизненным циклом на новых информационно-коммуникативных принципах.

Выводы. Виртуальное проектное предприятие интегрирует функционал цифровых комплексных производственных концепций — отраслевой платформы BIM, производственной цепочки на платформе и производственной виртуальной корпорации, которые отвечают особенностям трансформаций последовательных стадий и состава участников жизненного цикла объекта. Дальнейшая разработка и внедрение концепции виртуального проектного предприятия могут составить организационную, технологическую и структурную основу управления полным жизненным циклом проекта и новой организации труда и взаимодействия участников проекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жизненный цикл объекта капитального строительства, BIM-технологии, цифровая производственная концепция, модель управления, информационный поток, виртуальное проектное предприятие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1191–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200

Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows

Elena A. Gusakova, Aleksey N. Ovchinnikov

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

ABSTRACT

Introduction. The analysis of development and application of BIM technologies in the Russian construction industry has proven the absence of the system approach and uniform concepts of industry-specific information modelling technologies. Against this background, relevant issues include the strategic objective, or the digital transformation of the industry with the help of a uniform federal information platform, as well as development of long-term models designated for the organization and management of the whole life cycle of capital construction facilities.

Materials and methods. The article covers features and opportunities provided by digital technologies, including cloud computing and big data, the industrial Internet of things and the blockchain, in terms of practical prospects and information characteristics of the tasks that include organization of subsystems, participants and construction project stages.

Results. The structure of an information model designated for the organization and management of a capital construction facility's life cycle is presented as a set of interrelated information flows for consecutive stages, subsystems and project participants. It's been proven that traditional principles of organization and management restrain the accumulated powerful potential of digital transformation; therefore, the development of the architecture of a unified BIM platform requires new production concepts for the organization and management of project information flows. The co-authors propose an implementation pattern for the management concept and model: it represents a virtual design company, which organizes interaction between participants of a capital construction project and manages its life cycle according to new information and communication principles.

Conclusions. A virtual project company integrates the functions of digital integrated production concepts, including the BIM platform, the platform-based production chain and the virtual production corporation, which correspond to the features of transformations of successive stages and the composition of participants contributing to the facility's life cycle. Any further development and introduction of the concept of a virtual design company can serve as the organizational, technological and structural management base for the whole life cycle of a project and a new pattern of the work process organization and interaction between project developers.

KEYWORDS: life cycle of a capital construction facility, BIM technologies, digital production concept, management model, information flow, virtual design company

FOR CITATION: Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1191-1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в принципиально новых условиях постоянного роста количества и влияния факторов нестабильности глобальной экономики методы реализации строительных проектов, ориентированные на быструю максимизацию прибыли, не приносят результата. Устойчивость развития строительной отрасли в Российской Федерации в современных реалиях может сохраняться на базе долгосрочных экономических моделей проектов капитального строительства [1].

Рассмотрим направления и возможности практической интерпретации актуальных бизнес-моделей применительно к условиям реализации проектов капитального строительства и отрасли в целом. Самым непосредственным образом на критерии, принципы и подходы к разработке проектов строительства влияют современные экономические концепции круговой экономики и экономики цифрового контроля. Концепция круговой, или циркуляционной, экономики, ориентированная на возобновляемость и продление жизненного цикла (ЖЦ) продукта, ставит перед строительной наукой задачи стратегического планирования, управления полным жизненным циклом объекта строительства и поиска соответствующих критериев эффективности и моделей организации жизненного цикла проектов. Одновременно с этим в процессе цифровой трансформации экономического уклада вырабатываются подходы и инструменты, которые предлагают решение задач цифрового контроля путем создания системы алгоритмов информационных потоков и организационных взаимоотношений участников проекта и рынка недвижимости в интегрированной информационной среде [2, 3].

Цифровизация и распространение цифровых технологий организации и управления производством происходит интенсивно во всех отраслях и странах. Изначально эти процессы шли эволюционно и дискретно, автоматизируя отдельные процессы и производственные циклы. Сейчас выработка стратегий цифровой трансформации бизнес-процессов стала приоритетной задачей большинства крупных организаций вне зависимости от отрасли, особенностей производства или законодательной

специфики. Более того, внедрение информационных технологий управления производством во многих странах реализуется на уровне государственных программ цифровой трансформации экономики. Это, например, такие программы, как американская Advanced Manufacturing Technology, немецкая Industrie, стратегическая концепция развития производства в Китае, английская программа Innovate UK, австралийская National Digital Economy. Работы по формированию подобных прикладных платформ ведутся и в Российской Федерации [4–6].

В инвестиционно-строительном комплексе России с формированием новых условий и цифровых возможностей не только на уровне крупных корпораций, но и на отраслевом уровне, также сформировалась острая необходимость переосмысления целей информационного моделирования и выработки подходов с ориентацией на долгосрочные информационные модели объекта капитального строительства, организации и управления его жизненным циклом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения задач информационного моделирования объектов строительства на сегодняшний день наиболее широко используются BIM-технологии (англ. *Building Information Model* или *Modeling*), которые распространились во всем мире с начала 2000-х годов. При этом до настоящего времени большинство пользователей внедряют BIM в основном для работы с графическими 3D моделями. Практически потенциал и возможности BIM-технологий, обеспечивающие функции обмена информацией BIM-моделей и другие преимущества для строительных организаций и государства в целом, применяются редко [7, 8].

В российской строительной отрасли внедрение информационного моделирования является одной из задач национального проекта «Жилье и городская среда». Отраслевое развитие планируется обеспечить формированием системы управления жизненным циклом объекта капитального строительства, которая основывается на технологиях информационного моделирования, и плановым переходом к ее использованию. К 2023 г. должны быть обоснованы основные нормативы системы [9].

Следует отметить, что единая концепция перехода к этой системе до настоящего времени не сформировалась. За прошедшие годы в российской строительной практике сложилось несколько целевых установок и разных подходов к применению BIM-технологий и их инструментария в строительстве. На сегодняшний день в сфере информационного моделирования в строительстве нормативные документы, стандарты и своды правил разрабатываются разрозненно, применительно к различным уровням зрелости и интеграции BIM, часто содержат несогласованные требования [10, 11].

Так, например, концепция, разработанная в Федеральном центре нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (ФАО ФЦС), ориентирована на формирование на платформе BIM единой среды сбора и анализа данных об объектах строительства на территории Российской Федерации. Концепция предполагает возможность на всех этапах жизненного цикла взаимодействовать с информационной моделью объекта капитального строительства. В сфере анализа цен строительных ресурсов разработана Федеральная государственная информационная система ценообразования в строительстве (ФГИС ЦС), ориентированная на отслеживание цен строительных ресурсов и расчет агрегированных сметных цен. В области структуризации данных в строительстве проводится разработка классификатора строительной информации (КСИ) с целевой установкой его обязательного применения. В управлении с применением технологий информационного моделирования (ТИМ) ведутся разработки BIM-платформы для целей управления жизненным циклом строительных объектов, которая должна взаимодействовать с другими информационными системами, такими как ФАО ФЦС, ФГИС ЦС и Информационная система обеспечения градостроительной деятельности (ИСОГД).

Действующие в настоящее время стандарты и своды правил получили значительное число негативных замечаний и отзывов от экспертов профессионального сообщества, Росстандарта и BIM Ассоциации. На практике проявилось большое количество недоработок нормативных документов. Правила информационного моделирования, разработанные ранее в рамках государственного бюджета, в значительной части транслировали общедоступные американские методики и наработки. Часть данных правил и стандартов базировалась на уже отмененных международных стандартах, часть была не гармонизирована с национальными стандартами, сформированными идентично международным стандартам ИСО [12].

Согласно этим правилам, модель объекта строительства формировалась как совокупность архивов слабо структурированной информации — так называемых информационных контейнеров. Это

отражает сложившуюся структуру данных объектов капитального строительства, содержащихся в основном в справочниках и каталогах зданий, их отдельных частей и конструкций [13]. Такой подход к моделированию содержит значимые риски, связанные с тем, что информационный контейнер функционирует на основе внутренних закрытых проприетарных форматов данных. Это — патентованное программное обеспечение, которое работает с собственными форматами. Как следствие, информационное моделирование возведения и эксплуатации зданий и сооружений на такой основе усиливает импортозависимость капитального строительства.

Сложной проблемой остается и структурирование строительной информации. До настоящего времени не сложилось единого подхода к принципам построения классификатора строительной информации. Относительно существующих версий профессиональное сообщество, отраслевые организации и объединения высказывают много замечаний [14]. Наиболее значимые недостатки связаны с отсутствием в классификаторах и справочниках базовых библиотечных элементов учета жизненного цикла элементов, неполным ресурсным составом процессов и расценок, что не позволяет автоматизированно рассчитывать стоимость строительных ресурсов и проводить экспертизу стоимости строительства.

Другая группа рисков модели информационного контейнера — проблемы открытой передачи данных как между разными информационными системами участников проекта, так и между последовательными стадиями его жизненного цикла. Проблемы связаны со специфически большим и изменчивым числом участников строительного проекта и его специфически длительным полным жизненным циклом. Все это привносит особое требование к информационной модели объекта капитального строительства — необходимость адекватного отражения данных в процессе многократных трансформаций и в течение длительного времени [15].

Соответственно, государство, устанавливая задачу развития информационного моделирования в строительстве и стратегическую цель — разработку единой федеральной системы управления объектами капитального строительства на основе технологий информационного моделирования, должно получить ее концептуальное решение именно в открытом формате, который не зависит от конкретного разработчика. Одновременно с этим создаваемая концепция отраслевой цифровой платформы должна обеспечивать возможность добавления и трансформации данных разных форматов на протяжении всего стратегически обоснованного жизненного цикла строительного объекта.

Сейчас основным стандартом для совершенствования и оптимизации технологий информационного моделирования в российской строитель-

ной отрасли считается ГОСТ Р 10.0.02–2019/ИСО 16739-1:2018¹. Он является международным открытым информационным форматом данных об объектах строительства и включает в себя определения и характеристики зданий и сооружений. Стандарт предназначен для коллективного применения и обмена данными в программных ресурсах, используемых участниками проекта на различных стадиях его жизненного цикла, в том числе в ходе строительства и эксплуатации объектов капитального строительства [16].

Импульс для дальнейшей оптимизации внедрения BIM-технологий в российской строительной отрасли дало слияние технических комитетов по стандартизации в единый центр компетенций на базе BIM-Ассоциации — подкомитет 5 ТК 465 (созданный на основании приказа Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) от 12 июля 2019 г. № 1660 «О внесении изменений в приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июня 2017 г. № 1382 “Об организации деятельности технического комитета по стандартизации «Строительство»»). Цель создания интегрированной структуры состоит в консолидации накопленного опыта и профессиональных компетенций для оптимизации и роста эффективности внедрения BIM-технологий в строительстве. Функции и полномочия законодательного регулятора в сфере информационного моделирования осуществляет Минстрой России.

Анализ ситуации в целом говорит о том, что в профессиональной среде сформирован актуальный запрос и существует острая необходимость в едином системном подходе к отраслевым технологиям информационного моделирования и в разработке соответствующей комплексной концепции и стандартов. Разработка технической и нормативной документации в сфере информационного моделирования объектов капитального строительства до настоящего времени проводилась бессистемно и разрозненно [17]. Не сформировалась единая концепция стандартизации данных, единые направления и этапы решения практических задач информатизации строительной отрасли России, нет специализированных комплексных решений. Дальнейшая цифровая трансформация отрасли требует:

1) сформулировать единую стратегическую целевую установку информационного моделирования в сфере строительства;

2) определить структуру и логику отраслевых стандартов информационного моделирования в рамках национальных и иных стандартов;

3) разработать направления организации единой системы информационного моделирования зданий и сооружений;

4) обосновать практические подходы и порядок создания данной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информация, характеризующая объект капитального строительства, появляется, пополняется и трансформируется в течение всех стадий его жизненного цикла — проектирования, строительства, эксплуатации и ликвидации объекта. По сути, это — информационный поток, поэтому структурно информационная модель организации и управления жизненным циклом объекта строительства может быть представлена как совокупность взаимосвязанных информационных потоков подсистем проекта. Функционал цифровой трансформации организации и управления строительством определяется, с одной стороны, нарастающими возможностями и инструментарием информационно-коммуникационных технологий, с другой — спецификой информационных потоков в строительстве [18].

Информационно-коммуникационные технологии сейчас включают в себя огромное множество разработок — от отдельных алгоритмов до методологий, от микродатчиков состояния конструкций до общих концепций, определяющих организацию бизнес-процессов и отношений между участниками проекта, построение соответствующей архитектуры программного обеспечения и области ее наилучшего применения. Консолидация множества алгоритмов, инструментов и подходов IT-технологий приводит к образованию абсолютно новых условий и возможностей организации и управления процессами в отрасли, определяет суть и стратегию изменений соответствующих информационных потоков и формирует их новую инфраструктуру.

Рассуждая о перспективах цифровой трансформации организации и управления жизненным циклом объектов капитального строительства, выделим информационно-коммуникационные технологии, наиболее близкие к отраслевым задачам информационного моделирования.

Во-первых, это — облачные технологии (англ. *Cloud Computing*), которые дают возможность работать с проектной информацией с разных устройств многочисленным участникам проекта с минимальными усилиями по управлению их взаимодействием. На облачных сервисах, таких как IaaS, PaaS, SaaS, и подобных им, в настоящее время базируются технологии коллективного использования ресурсов в бизнес-процессах. Во-вторых, это — технологии больших данных (англ. *Big Data*), использующие программные инструменты горизонтального масштабирования для анализа и синтеза очень значительных объемов многообразных

¹ ГОСТ Р 10.0.02–2019/ИСО 16739-1: 2018. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства.

данных из разных источников. Важно, что для задач организации и управления жизненным циклом строительного проекта характерна именно разнородная и неструктурированная исходная информация. Стандартные методы и инструменты работы с данными не позволяют решать задачи управления такого уровня, а инструменты и методы больших данных применительно к управлению жизненным циклом проекта отвечают специфике информационных потоков объекта капитального строительства. Программные продукты и методы Big Data дают возможность работать с разными, независимыми и часто неструктурированными массивами прямой и косвенной информации, имеющей отношение к проекту, а также анализировать значительные объемы данных разных подсистем проекта, информация которых прирастает, сохраняется и обновляется с разной периодичностью и скоростью. К настоящему времени ведущими разработчиками создано много программных решений по обработке больших данных. Существуют программы от Microsoft, Oracle, IBM, Hewlett-Packard, EMC, Apache Software Foundation (HADOOP) и др. [19, 20].

Еще одна цифровая концепция, очень интересная с точки зрения информационных потоков жизненного цикла проекта, — промышленный интернет вещей (*англ. IIoT — Industrial Internet of Things*) [20]. Суть концепции — объединение инженерных наработок по оснащению датчиками и онлайн подключению конструкций и устройств. Их интеграция инструментально обеспечивает мониторинг, организацию и управление процессами производства в реальном времени, в удаленном и автоматическом режиме. Применительно к инженерным и бизнес-процессам объекта капитального строительства IIoT помогает автоматизировать организацию его строительства и эксплуатации, базируясь на потоках показаний датчиков. Они могут составить инженерно-информационную структуру обоснования решений и управления строительными мощностями и ресурсами проекта, контроля состояния конструкций инженерных подсистем здания, построения экономических прогнозов. Цифровая концепция IIoT промышленного интернета вещей уже сейчас формирует инфраструктурную основу информационных потоков организации и управления жизненного цикла проекта.

В контексте открытости и безопасности формата управления жизненным циклом строительного объекта целесообразно также рассмотреть прикладные перспективы цифровой технологии блокчейн (*англ. Blockchain*). Изначально блокчейн технологически разрабатывалась для виртуальной платежной системы Биткойна (от *англ. Bitcoin*, от *bit* — бит и *coin* — монета) и нигде больше не применялась [21]. В последнее время эта технология стремительно расширяет сферы различных

применений. Функционал блокчейна разработан таким образом, что:

- информация существует в распределенной сети, построенной и поддерживаемой сетевыми пользователями;
- данные множественно скопированы, благодаря чему обеспечивается максимальная устойчивость и безопасность хранения данных;
- вся информация имеет открытую пред историю, что позволяет проконтролировать подлинность и происхождение данных.

Учитывая специфику информационных потоков жизненного цикла проекта в строительстве, реализация этих функций необходима и крайне востребована в информационной модели управления.

В целом BIM в строительстве наполняется новыми возможностями поддержки решений. Они все сильнее влияют на принципы организации взаимодействия, обоснования решений и производственные процессы. Традиционно сложившиеся принципы организации и управления сдерживают потенциал применения BIM. Поэтому разработка архитектуры единой отраслевой платформы BIM предполагает реинжиниринг организации и управления информационными потоками и выработку новой производственной концепции.

Цифровые технологии в любой отрасли приводят к экономической целесообразности перехода от количества автоматизированных бизнес-процессов к качественно новой их информационно-коммуникативной организации и изменению системы организации производства. В последние годы на основе сетевых инструментов общения формируются комплексные цифровые производственные концепции, которые позволяют организовать взаимодействие участников производства на новых принципах.

Определяющая концепция отраслевой цифровизации в целом и строительной отрасли в том числе — отраслевая цифровая платформа [22]. Платформа консолидирует все необходимые для решения отраслевых задач информационные и коммуникационные программные инструменты, предоставляет специалистам и другим участникам доступ к информации и профессиональным сервисам по аналитике, планированию, организации, управлению и др. Без платформы нельзя отследить полный жизненный цикл проекта и корректно отразить его информационными потоками. Системообразующее свойство цифровой платформы — ее функционал или упорядоченное множество алгоритмов взаимодействий участников проекта и производства в едином информационном пространстве. Доступные функции взаимодействия участников проекта и соответствующие алгоритмы определяют достоинства, недостатки, эффективность и уровень зрелости цифровой платформы. Платформы классифицируют в зависимости от доступного функционала.

Отраслевой цифровой платформе капитального строительства необходимо обладать комплексным функционалом, позволяющим решать информационные задачи (доступ и работа с данными по проекту и рынку недвижимости), инфраструктурные задачи (доступ к цифровым ресурсам), технологические задачи (доступ к специализированным инструментам и технологиям) и корпоративные задачи (оптимизация процессов управления).

Перспективной цифровой концепцией, подходы которой применимы к управлению ЖЦ проекта капитального строительства, является также производственная цепочка на платформе, описанной в работе [23]. Последовательность стадий жизненного цикла может быть рассмотрена как организационно-технологическая цепочка и множество соответствующих информационных потоков: проектировщик → производители строительных материалов, конструкций и инженерных подсистем здания → строитель → управляющая компания-пользователи-собственники. Сейчас эта цепочка организована так, что каждый участник проекта закладывает свои риски в цену работы или промежуточного результата. Участник следующей стадии ЖЦ приобретает предшествующие риски проекта и прибавляет свои. Традиционное взаимодействие участников последовательных стадий проекта приводит к постоянной аккумуляции рисков и, соответственно, цены проекта. Это делает цепочку инновационно невосприимчивой. Каждый выстраивает свои бизнес-процессы, не беспокоясь о проекте в целом.

Для исправления сложившейся системы производственная цепочка в целом моделируется в единой информационной среде цифровой платформы. Это делает более прозрачным и объективным вклад каждого участника производственной цепочки в себестоимость проекта или конечного продукта. Целевая установка данной концепции — не максимум быстрой прибыли, а создание долгосрочного конкурентного преимущества проекта.

Концепция производственной цепочки, безусловно, требует существенной адаптации под особенности капитального строительства и специфически длительный жизненный цикл проекта. Тем не менее даже частичное внедрение этой концепции приводит к качественным изменениям в мышлении участников и условиях контрактов в следующих направлениях:

- коллективное понимание общей цели проекта;
- осознание своего места в системе его ЖЦ;
- развитие «умных контрактов» кооперативного взаимодействия, позволяющих пропорционально разделять успехи и ошибки проекта.

Еще одна цифровая производственная концепция, хорошо соответствующая специфике ЖЦ строительного проекта, — производственная виртуальная корпорация [24]. Основной принцип работы виртуальной корпорации — изменение состава

участников и организационно-управленческой структуры (или постоянная трансформация виртуального субъекта) в ответ на изменчивость внутренних и внешних факторов. В производственной виртуальной корпорации для быстрой трансформации и обеспечения гибкости организационной структуры применяют стандартизированные алгоритмы:

- мониторинга потребности в ресурсе;
- онлайн-анализа множества доступных ресурсов и их характеристик;
- привлечения ресурса и отказа от его использования.

Для управления жизненным циклом объекта капитального строительства по аналогии с производственной виртуальной корпорацией предлагается управленческая модель с гибкой организационной структурой, отвечающая особенностям трансформаций последовательных стадий и состава участников жизненного цикла объекта капитального строительства, — виртуальное проектное предприятие (рис. 1).

В течение жизненного цикла объекта под проект интегрируется множество ресурсов — финансовых, производственных, материальных, интеллектуальных, информационных, коммуникационных и пр. Мобилизация необходимых ресурсов под потребности последовательных стадий проекта может базироваться на отраслевой цифровой платформе ВІМ в рамках инфраструктуры и функциональных сервисов виртуального проектного предприятия. Отраслевая цифровая платформа и ее инструментарий позволяют оперативно организовать привлечение ресурсов и постоянно контролировать проект. Платформа дает возможность пользоваться ресурсом в необходимом объеме в требуемый период времени и снизить потери от простоя или поиска ресурса. А виртуальное проектное предприятие как управленческая модель наряду с организационной гибкостью сводит использование собственных ресурсов к необходимому и достаточному минимуму. Практически собственный актив в большинстве случаев обходится дороже, чем привлекаемый ресурс, поскольку его надо поддерживать в эксплуатационном состоянии, даже когда он не обслуживается. В виртуальном проектном предприятии в качестве собственных активов используются только те ресурсы, которые требуются в течение длительного периода жизненного цикла проекта. Это становится еще одним фактором повышения эффективности проекта и его жизненного цикла.

Виртуальное проектное предприятие функционирует в реальном и цифровом формате в течение полного жизненного цикла объекта. Информационные потоки последовательных стадий жизненного цикла выстраиваются концептуально как производственная цепочка на единой отраслевой цифровой платформе. Все организационные и ресурсные изменения фиксируются в цифровом двойнике про-

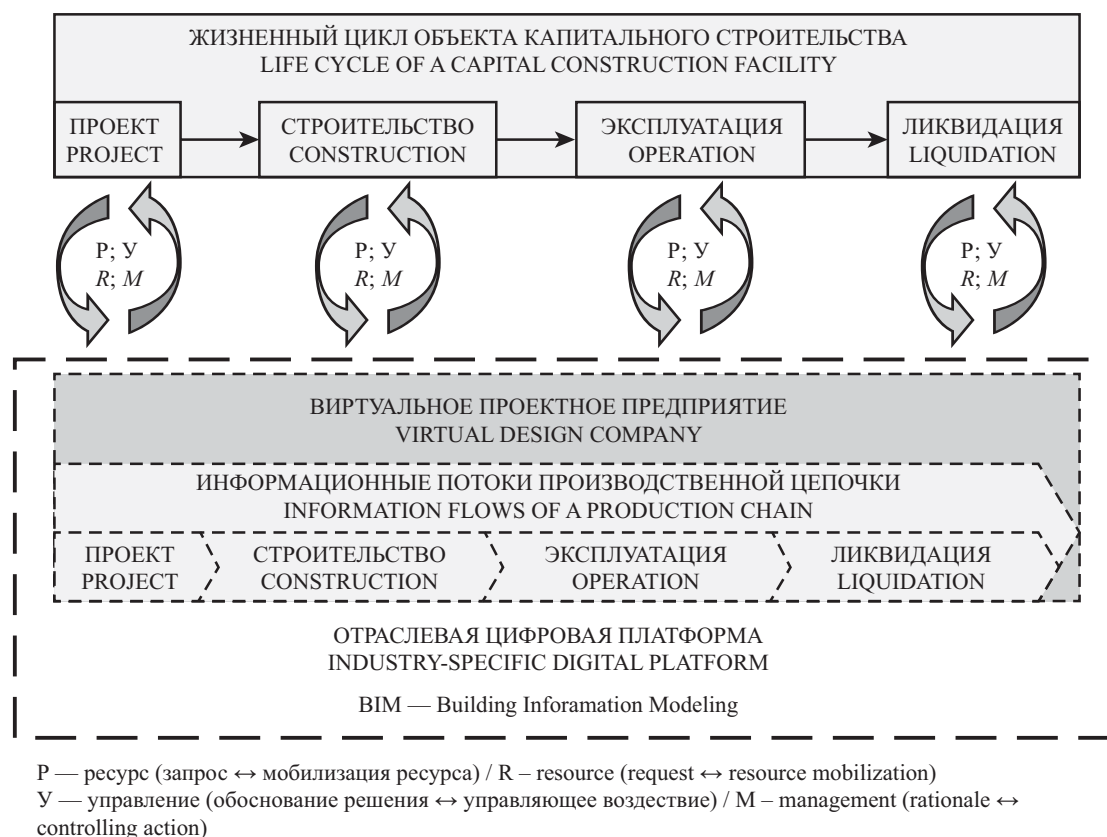


Рис. 1. Виртуальное проектное предприятие — модель управления жизненным циклом объекта капитального строительства

Fig. 1. A virtual design company: the life cycle management model of a capital construction facility

екта в режиме реального времени с помощью облачных технологий, больших данных, интернета вещей и коммуникационных технологий передачи больших объемов информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, в целом в строительной отрасли Российской Федерации сложились различные точки зрения на задачи развития, цели и результаты внедрения технологий информационного моделирования. При этом профессиональным сообществом осознана актуальная необходимость переосмысления целей BIM-технологий в направлении долгосрочных экономических моделей и управления жизненным циклом объектов капитального строительства. С этих позиций перспективна производственная концепция — виртуальное проектное

предприятие на единой отраслевой платформе BIM, объединяющее цифровой инструментарий, соответствующий специфике информационных потоков полного жизненного цикла проекта в строительстве.

Виртуальное проектное предприятие как управленческая модель оптимизирует и сокращает издержки сложившихся систем управления. При дальнейшей разработке и внедрении данная управленческая модель на отраслевой платформе BIM может составить информационно-технологическую основу новой организации труда и взаимодействия участников проекта — сотрудников и компаний. Одновременно с этим виртуальное проектное предприятие предлагается как производственная концепция и организационная основа перехода к BIM полного цикла, к управлению полным жизненным циклом проекта и реинжиниринга соответствующих информационных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.Е. Монологи о бизнесе. 2-е изд. М. : Изд-во Перо, 2017. 189 с.
2. Figueiredo K., Hammad A.W., Haddad A. Sustainable construction achieved through life cycle

- assessment: methodology, limitations and the way forward // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020. Vol. 4. Pp. 576–583. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11360-8

3. *Hopkinson P., De Angelis R., Zils M.* Systemic building blocks for creating and capturing value from circular economy // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. P. 104672. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104672
4. *Goel A., Ganesh L.S., Kaur A.* Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. P. 117676. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117676
5. *Birasnav M., Bienstock J.* Supply chain integration, advanced manufacturing technology, and strategic leadership: An empirical study // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 130. Pp. 142–157. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.021
6. *Antonopoulou K., Begkos C.* Strategizing for digital innovations: Value propositions for transcending market boundaries // *Technological Forecasting and Social Change*. 2020. Vol. 156. P. 120042. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120042
7. *Oraee M., Hosseini M.R., Edwards D.J., Li H., Papadonikolaki E., Cao D.* Collaboration barriers in BIM-based construction networks: A conceptual model // *International Journal of Project Management*. 2019. Vol. 37. Issue 6. Pp. 839–854. DOI: 10.1016/j.ijproman.2019.05.004
8. *Куракова О.А., Макеева Х.* Использование BIM-технологий на стадии эксплуатации объектов недвижимости // *Недвижимость: экономика, управление*. 2018. № 2. С. 55–59. URL: <http://n-eu.ru/ru/article/download/620>
9. *Ефимов К.В., Беляков С.И.* Исследование актуальной проблематики национального проекта «Жилье и городская среда» // *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 9 (110). С. 458–461.
10. *Волков А.А., Воложенин А.С.* Выбор эффективной системы управления базами данных для проектов автоматизированных систем обработки информации и управления в строительных организациях // *Научное обозрение*. 2016. № 7. С. 240–246.
11. *Хрипко Т.В.* Эффективность управления жизненным циклом объектов с использованием информационного моделирования // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 9. С. 24–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.24-29
12. *Гинзбург А.В.* Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 9. С. 61–65. URL: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2016&v=09&p=00&r=10>
13. *Волков А.А., Свиридов И.А.* Поэтапная классификация алгоритмов реализации инвестиционно-строительных проектов // *Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы* : сб. мат. сем., проводимого в рамках VI Междунар. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. Москва, 2018. С. 25–28.
14. *Koo Bonsang, La Sunmin, Cho Nam-Wook, Yu Youngsu.* Using support vector machines to classify building elements for checking the semantic integrity of building information models // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 98. Pp. 183–194. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.015
15. *Тополян М.Р.* Жизненный цикл территории: горизонтальная, вертикальная и диагональная динамика развития // *Теоретическая экономика*. 2018. № 4 (46). С. 171–177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36544469>
16. *Федорин М.Д.* BIM-технологии как организационно-управленческая инновация в строительной сфере // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2019. № 6–2. С. 143–148. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41763450>
17. *Кропотухина Н.А., Сосницкая К.С., Сиско А.С., Бибикова А.Ю.* Анализ использования системы BIM // *E-Scio*. 2018. № 10 (25). С. 155–160. URL: <http://e-scio.ru/?p=5322>
18. *Гусакова Е.А., Волков А.А., Овчинников А.Н.* Развитие среды программирования информационных потоков жизненного цикла строительного объекта // *Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы* — 2019 : сб. мат. Всеросс. науч. конф. Москва, 25 ноября 2019 г. М. : Изд-во МИСИ – МГСУ, 2019. С. 51–57.
19. *Куприяновский В.П., Климов А.А., Воронаев Ю.Н., Покусев О.Н. и др.* Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM // *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. № 8 (3). С. 55–74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42543776>
20. *Bilal M., Oyedele L., Kusimo H., Owolabi H., Akanbi L., Ajayi A. et al.* Investigating profitability performance of construction projects using big data: A project analytics approach // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 26. P. 100850. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100850
21. *Дорошенко А.В., Челышков П.Д.* О применении технологии интернета вещей в умном городе // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании* : сб. мат. VI Междунар. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 26–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36572904>
22. *Жевоченко У.В., Рахимова С.А.* Цифровизация экономики. Блокчейн // *Теория и практика развития предпринимательства: современные концепции, цифровые технологии и эффективная система* : мат. VI Междунар. науч. конгр. / под науч. ред. А.В. Шарковой, О.Н. Васильевой, Б. Оторовой. Ч. 1. М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2018. С. 82–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35178399>

23. Букунов А.С., Букунова О.В. Обмен информацией в единой системе при создании BIM // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 г. СПб. : СПбГАСУ, 2019. С. 59–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38182539>

24. Papetti A., Marconi M., Rossi M., Germani M. Web-based platform for eco-sustainable supply chain management // Sustainable Production and Consumption. 2019. Vol. 17. Pp. 215–228. DOI: 10.1016/j.spc.2018.11.006

25. Бережнов Г.В. Стратегическая модель предприятия будущего : монография. 2-е изд., доп. М. : Дашков и К, 2019. 338 с.

Поступила в редакцию 6 июня 2020 г.

Принята в доработанном виде 29 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Александровна Гусакова — доктор технических наук, доцент, профессор, профессор кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8364-5935, Scopus: 57192369875, ResearcherID: V-8343-2017, ORCID: 0000-0001-5441-2711; GusakovaEA@mgsu.ru;

Алексей Николаевич Овчинников — аспирант кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4941-9582, Scopus: 57209306137, ORCID: 0000-0001-0948-9925; inza73@gmail.com.

REFERENCES

1. Shevchenko A.E. *Monologues about business*. 2nd ed. Moscow, Perot Publishing House, 2017; 189. (rus.).

2. Figueiredo K., Hammad A.W., Haddad A. Sustainable construction achieved through life cycle assessment: methodology, limitations and the way forward. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020; 4:576-583. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11360-8

3. Hopkinson P., De Angelis R., Zils M. Systemic building blocks for creating and capturing value from circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 155:104672. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104672

4. Goel A., Ganesh L.S., Kaur A. Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 236:117676. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117676

5. Birasnav M., Bienstock J. Supply chain integration, advanced manufacturing technology, and strategic leadership: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*. 2019; 130:142-157. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.021

6. Antonopoulou K., Begkos C. Strategizing for digital innovations: Value propositions for transcending market boundaries. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020; 156:120042. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120042

7. Oraee M., Hosseini M.R., Edwards D.J., Li H., Papadonikolaki E., Cao D. Collaboration barriers in

BIM-based construction networks: A conceptual model. *International Journal of Project Management*. 2019; 37(6):839-854. DOI: 10.1016/j.ijproman.2019.05.004

8. Kurakova O.A., Makeeva H. Using BIM-technologies at the stage of operation of real estate objects. *Real estate: economics, management*. 2018; 2:55-59. URL: <http://n-eu.ru/ru/article/download/620> (rus.).

9. Efimov K.V., Belyakov S.I. Analysis of topical issues of the national project "Housing and urban environment". *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2019; 9(110):458-461. (rus.).

10. Volkov A.A., Volozenin A.S. Choosing an effective database management system for projects of automated information processing and management systems in construction organizations. *Science review*. 2016; 7:240-246. (rus.).

11. Khripko T.V. Effectiveness of life cycle management of projects using information modeling. *Industrial and civil engineering*. 2019; 9:24-29. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.24-29 (rus.).

12. Ginzburg A.V. Building life cycle information modelling. *Industrial and civil engineering*. 2016; 9:61-65. URL: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2016&v=09&p=00&r=10> (rus.).

13. Volkov A.A., Sviridov I.A. Phased classification of algorithms for the implementation of investment and construction projects. *System engineering of construction. Cyber-physical building systems : collection of materials of the seminar held in the framework of the VI International Scientific Conference. Moscow, November 14–16, 2018*. Moscow, 2018; 25-28. (rus.)

14. Koo Bonsang, La Sunmin, Cho Nam-Wook, Yu Youngsu. Using support vector machines to classify building elements for checking the semantic integrity of building information models. *Automation in Construction*. 2019; 98:183-194. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.015

15. Topolyan M.R. The life cycle of the territory: horizontal, vertical and diagonal dynamics of development. *The theoretical economy*. 2018; 4(46):171-177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36544469> (rus.).

16. Fedorin M.D. BIM-technologies as organizational and managerial innovation in the construction sector. *Actual issues of the modern economy*. 2019; 6-2:143-148. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41763450> (rus.).

17. Kropotukhina N.A., Sosnitskaya K.S., Sisko A.S., Bibikova A.Yu. Analysis of the use of the BIM system. *E-Scio*. 2018; 10(25):155-160. URL: <http://e-scio.ru/?p=5322> (rus.).

18. Gusakova E.A., Volkov A.A., Ovchinnikov A.N. Development of a programming environment for information flows of the life cycle of a building object. *Construction system engineering. Cyberphysical Building Systems — 2019 : collection of materials of the All-Russian Scientific Conference*. Moscow, Publishing house MISI – MGSU, 2019; 51-57. (rus.).

19. Kupriyanavsky V.P., Klimov A.A., Voropaev Yu.N., Pokusaev O.N. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies related to ontologies, 5G, IoT and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020; 8(3):55-74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42543776> (rus.).

20. Bilal M., Oyedele L., Kusimo H., Owolabi H., Akanbi L., Ajayi A. et al. Investigating profitability per-

formance of construction projects using big data: A project analytics approach. *Journal of Building Engineering*. 2019; 26:100850. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100850

21. Doroshenko A.V., Chelyshkov P.D. On the application of the technology of the Internet of things in a smart city. *Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education : collection of materials of the VI International Scientific Conference. Moscow, November 14–16, 2018*. Moscow, MGSU, 2018; 26-29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36572904> (rus.).

22. Zhevochenko U.V., Rakhimova S.A. Digitalization of the economy. Blockchain. *Theory and practice of entrepreneurship development: modern concepts, digital technologies and an effective system : materials of the VI International scientific congress / under scientific. ed. A.V. Sharkova, O.N. Vasilieva, B. Otorova. Part 1*. Moscow, Publishing and Trade Corporation “Dashkov and K °”, 2018; 82-85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35178399> (rus.).

23. Bukunov A.S., Bukunova O.V. Information exchange in a single system when creating BIM. *BIM-modeling in the problems of construction and architecture: materials of the II International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, May 15–17, 2019*. St. Petersburg, SPbGASU, 2019; 59-64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38182539> (rus.).

24. Papetti A., Marconi M., Rossi M., Germani M. Web-based platform for eco-sustainable supply chain management. *Sustainable Production and Consumption*. 2019; 17: 215–228. DOI:10.1016/j.spc.2018.11.006

25. Berezhnov G.V. *Strategic model of the enterprise of the future*. 2nd ed. aug. Moscow, Dashkov and K Publ., 2019; 338. (rus.).

Received June 6, 2020.

Adopted in a revised form on June 29, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

B I O N O T E S : **Elena A. Gusakova** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Professor of the Department of information systems technology and automation in construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8364-5935, Scopus: 57192369875, ResearcherID: V-8343-2017, ORCID: 0000-0001-5441-2711; GusakovaEA@mgsu.ru;

Aleksey N. Ovchinnikov — graduate student of the Department of information systems technology and automation in construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4941-9582, Scopus: 57209306137, ORCID: 0000-0001-0948-9925; inza73@gmail.com.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями).

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. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс *Citethisforme.com*.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель 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.

Вionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

	Форма № ПД-4									
Извещение Кассир	УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 40%; text-align: right;">Вестник МГСУ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(наименование платежа)</td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Сумма платы за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 ____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)		Вестник МГСУ	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)	
	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9								
	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)								
		Вестник МГСУ								
	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)								
	Квитанция Кассир	Форма № ПД-4 УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 40%; text-align: right;">Вестник МГСУ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(наименование платежа)</td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Сумма платы за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 ____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)		Вестник МГСУ	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)
		7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9							
		(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)							
			Вестник МГСУ							
		(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) 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	
Извещение Кассир	УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9 (ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа) в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Вестник МГСУ _____ (номер лицевого счета (код) плательщика) Сумма _____ платежа <u>6 880</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись _____ плательщика _____
	Форма № ПД-4 УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9 (ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа) в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Вестник МГСУ _____ (номер лицевого счета (код) плательщика) Сумма _____ платежа <u>6 880</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись _____ плательщика _____

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/>

