

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 4/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 4
2020**

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

Сквозной номер 139

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 4
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	27.04.2020.
Подписан в свет	30.04.2020.

Формат 60×84/8. Усл.печ. л. 18,14. Тираж 100 экз. Заказ № 61

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 Королёв, 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

Зав. редакцией

Анна Александровна Дядичева

Дизайн и верстка

Елена Владимировна Жукова

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык

Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор

Любовь Владимировна Светличная

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 учреждение «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

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 Российская академия 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:	27.04.2020

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

Moscow, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Managing editor

Anna A. Dyadicheva

Editors

Tat'yana V. Berdnikova

Corrector

Lyubov' V. Svetlichnaya

Layout

Elena V. Zhukova

Russian-English translation

Ol'ga V. Yudenkova

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

*В.В. Лалин, О.Н. Перцева, В.Р. Камалтдинов, Г.В. Мартынов,
Д.Е. Монастырева, Р.С. Тихонов*

**Расчет предварительно напряженных конструкций
на ударную нагрузку 482**

А.Н. Леонова, О.Д. Софьяников, И.А. Скрипкина

**Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами
при воздействии агрессивной среды 496**

Karina Buka-Vaivade, Mikhail N. Kirsanov, Dmitrijs O. Serdjaks

**Расчет деформаций модели плоской фермы консольно-рамного типа
с произвольным числом панелей (на английском языке). 510**

В.П. Королев, Г.А. Герман

**Формирование проектных требований на основе управления
коррозионной защищенностью стальных конструкций. 518**

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.Ю. Глинянова, В.Н. Азаров

**Экологическая безопасность жилых и общественно-деловых зон с позиции
мониторинга PM_{2.5}, PM₁₀ на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) 533**

Б.Н. Житенев, Л.Е. Йорданова

**Очистка промывных вод станций обезжелезивания подземных вод
коагулированием в присутствии фосфатов 553**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ю.П. Ляпичев

**Численные расчеты, проектирование и поведение каменно-насыпных плотин
с железобетонными экранами при сейсмических воздействиях 569**

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.Д. Самарин

**Расчет теплового режима помещения при автоматическом регулировании
климатических систем 585**

Чан Ха Куан, Е.С. Гогина

Применение загрузочного материала BioChip в реакторе периодического действия. 592

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Соловьев, А.П. Корчагин

**Актуальные вопросы совершенствования системы ценообразования
в строительстве в переходном периоде. 605**

Требования к оформлению научной статьи. 617

CONTENTS

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

*Vladimir V. Lalin, Olga N. Pertseva, Vladimir R. Kamaltdinov, Gleb V. Martynov,
Daria E. Monastyreva, Roman S. Tikhonov*

Calculation of prestressed structures for shock loading. 482

Anna N. Leonova, Oleg D. Sofyanikov, Irina A. Skripkinav

**Features of strengthening metal structures with composite materials under
the influence of an aggressive environment. 496**

Karina Buka-Vaivade, Mikhail N. Kirsanov, Dmitrijs O. Serdjaks

**Calculation of deformations of a cantilever-frame planar
truss model with an arbitrary number of panels. 510**

Vladimir P. Korolyov, Galina A. German

**Current issues of improving the pricing system in construction
in the transition period. 518**

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Irina Yu. Glinyanova, Valery N. Azarov

**Environmental safety of residential and public areas in the context of PM2.5,
PM10 monitoring on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*). 533**

Barys N. Zhytsianiou, Lyudmila E. Yordanova

**Backwash water treatment by coagulation in the presence of phosphates
at underground water iron removal stations 553**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Yury P. Lyapichev

**Numerical analysis, design and behavior of rockfill dams
with reinforced concrete faces during seismic actions 569**

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Oleg D. Samarin

**The calculation of the thermal mode of a room with automatic regulation
of climate systems. 585**

Tran Ha Quan, Elena S. Gogina

The applicability of bio-carrier BioChip in Sequencing Batch Reactors 592

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

Vyacheslav V. Solov'ev, Alexey P. Korchagin

**Current issues of improving the pricing system in construction
in the transition period. 605**

Requirements for research paper design 617

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

УДК 539.3:004

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495

Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку

В.В. Лалин¹, О.Н. Перцева², В.Р. Камалтдинов³,
Г.В. Мартынов¹, Д.Е. Монастырева¹, Р.С. Тихонов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² ПСС ГРАЙТЕК; г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Институт технологий преднапряжения (ИТП); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Конструкции с предварительным напряжением имеют широкое распространение и развиваются. Зачастую с применением преднапряжения изготавливаются покрытия зданий специального назначения, требующие расчетов на экстремальные воздействия. К таким воздействиям относится удар самолета, представляющий нестационарную нагрузку. Моделирование преднапряженных конструкций и расчет ударных нагрузок затруднительно реализовать в классических расчетных программах. Универсальным инструментом для решения таких задач является ПК SOFiSTiK. Данный программный комплекс помимо гибкого функционала интегрирован в среду информационного моделирования и позволяет взаимодействовать с самыми современными программными решениями.

Материалы и методы. Для описания методики выбрали покрытие особого назначения и выполнили расчет на удар самолета Learjet 23. Для моделирования предварительного напряжения использовали интерфейс SOFiPLUS. Вводимые элементы обладают полнотой свойств, отражают геометрию напряженных канатов, параметры сцепления и этапы возведения. Для описания ударного воздействия применили внутренний язык программирования CADINP. Величина воздействия задана в виде дискретной функции с 11 интервалами интегрирования.

Результаты. Полученные данные были обработаны, характер изменения деформаций покрытия в первые секунды падения самолета представлен графически. Также выведены изополя внутренних изгибающих моментов покрытия для подбора армирования и эпюра моментов балок от воздействия предварительного напряжения с учетом потерь натяжения.

Выводы. НПК SOFiSTiK позволяет решать сложные инженерные задачи с высокой степенью автоматизации. Моделирование преднапряженных конструкций становится нетрудоемким процессом с гибкими параметрами настройки, исключая вероятность ошибки от ручных расчетов. Благодаря открытому программному коду возможен расчет на нетипичные экстремальные воздействия. Полученные графики и эпюры подтверждают прохождение проверок по предельным состояниям рассматриваемого покрытия, а также могут быть использованы для проектирования и расчета аналогичных конструкций особого назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, нестационарная нагрузка, предварительное напряжение, потери напряжения, большепролетное покрытие, экстремальное воздействие, взрыв, удар самолета, информационные технологии, ПК SOFiSTiK

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лалин В.В., Перцева О.Н., Камалтдинов В.Р., Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Тихонов Р.С. Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 482-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495

Calculation of prestressed structures for shock loading

Vladimir V. Lalin¹, Olga N. Pertseva², Vladimir R. Kamaltdinov³,
Gleb V. Martynov¹, Daria E. Monastireva¹, Roman S. Tikhonov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation;

² PSS GRAITEC; St. Petersburg, Russian Federation;

³ Institute of technology of prestressing; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. With the use of prestressing, coatings are made for special-purpose buildings, requiring calculations for extreme impacts. Such impacts include an airplane strike. Modeling of prestressed structures and calculation of shock loads

is difficult to implement in classical calculation programs. A universal tool for solving such problems is the PC SOFiSTIK. This software complex allows you to interact with the most modern software solutions.

Materials and methods. For the description of the method, special-purpose coating was selected and the strike calculation of the Learjet 23 aircraft was performed. For modeling prestressing, the SOFIPLUS interface is used. To describe the impact, the internal programming language CADINP is used.

Results. The nature of the change in the coating deformations in the first seconds of the aircraft crash is presented graphically. Also, iso-ares of internal bending moments of the coating were derived for the selection of reinforcement and the diagram of the moments of the beams from the action of prestressing, taking into account tension losses.

Conclusions. SOFiSTIK PC allows you to solve complex engineering problems with a high degree of automation. Thanks to the open source code, it becomes possible to calculate atypical extreme effects. The obtained graphs and diagrams confirm the passage of checks on the limiting states of the coating, and can also be used to design and calculate similar special-purpose structures.

KEYWORDS: modeling, unsteady loading, prestressing, stress loss, extreme impact, explosion, aircraft impact, information technology, SOFiSTIK PC

FOR CITATION: Lalin V.V., Pertseva O.N., Kamaltdinov V.R., Martynov G.V., Monastyreva D.E., Tikhonov R.S. Calculation of prestressed structures for shock loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):482-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование предварительно напряженных конструкций является одной из наиболее актуальных проблем для расчета зданий и сооружений. Данные конструкции отличаются натяжением арматуры в сжатой зоне бетона для улучшения трещиностойкости и сокращения деформаций.

Важный аспект расчета конструкций с предварительно напряженной арматурой — расчет потерь напряжения. Потери, возникающие от ползучести и усадки бетона, могут оказать значительное влияние на величину обжатия и, следовательно, жесткость конструкции в целом [1]. Проводились экспериментальные исследования по вычислению потерь, которые показали занижение значений, вычисляемых аналитически [2].

Существуют различные способы создания преднапряжения — с натяжением на упоры и на бетон, с трением в каналах и без него [3]. Технологии натяжения арматуры постоянно развиваются, что сопровождается многочисленными экспериментальными исследованиями [4]. Так, работа Н.Д. Рябенко посвящена анализу передачи усилий обжатия бетону и изучению свойств сцепления арматуры [5]. Созданная им установка позволила определить изменение деформаций арматуры в зависимости от длины заделки.

В условиях увеличивающихся объемов возведения сооружений с предварительным напряжением важно иметь и соответствующие средства проектирования. Классические для расчета зданий и сооружений программные комплексы — SCAD и Lira [6]. Согласно принятым методам расчета моделирование предварительно напряженных кон-

струкций сопровождается большим количеством ручных расчетов. Влияние от преднапряжения прикладывается к элементам обычными продольными и распределенными нагрузками. Методика расчета этих эквивалентных нагрузок представлена в работе Д.В. Портаева [7].

Учитывая вышеизложенное, можно отметить, что для моделирования и расчета предварительно напряженных конструкций необходимо применение новых актуальных методов.

Проектирование зданий и сооружений помимо расчета на обычные постоянные, длительные и кратковременные нагрузки зачастую требует учета особых воздействий. В зависимости от назначения здания и возможных последствий частичного или полного его разрушения определяют уровень ответственности здания. Объекты повышенной ответственности, оказывающие значительное влияние на экологические, социальные и экономические аспекты, предполагают защиту от экстремальных воздействий с достаточно низкой вероятностью возникновения.

Экстремальные нагрузки могут быть разделены по природе возникновения на техногенные и естественные. Последние связаны с многообразным влиянием окружающей среды, зависят от региона строительства и его сейсмической активности, экстремальных температур, пожарной опасности прилегающих зеленых территорий, особенностей ближайших акваторий, климатических и ураганных явлений.

Техногенные экстремальные нагрузки подразделяют на внутренние и внешние. Первые возникают соответственно внутри предприятий при неправильной эксплуатации, разрушении оборудования

и возникновении аварийных ситуаций. Внешние техногенные факторы — воздействия, возникающие в результате действия человека, такие как распространение опасных выбросов, взрывы и падения летательных аппаратов. Падение самолета представляет собой ударную нагрузку и оказывает на конструкцию наиболее значительное влияние, вызывая большие усилия и деформации [8–9].

Большое число работ посвящено расчету сооружений на динамические воздействия [10] и, в частности, на сейсмические. Описаны и обсуждены расчеты согласно современным нормативным документам [11]. Проведены аналитические расчеты в расчетном комплексе Lira [12, 13]. Однако расчет нестационарных воздействий, случайно изменяющихся во времени, не заложен в классические расчетные комплексы [14]. К такому типу нагрузок относится и ударная нагрузка от падения самолета. Описать ее можно только путем задания дискретной функции с вводом значений нагрузки для каждого интервала времени [15]. Проводились исследования и предложены аналитические методы расчета задач с нелинейной нагрузкой, установлены зависимости точности расчетов от интервалов интегрирования [16]. Способы моделирования таких воздействий в расчетных комплексах представлены не были. При выборе подходящего инструмента важно учесть интеграцию в нормативные базы, доступность потенциальным пользователям, а также совместимость с технологиями информационного моделирования (BIM).

С самого начала проектирования существовала проблема большого количества ошибок и неточностей в рабочих чертежах строительных проектов. Весомая причина таких недочетов — человеческий фактор. Сложность координации работы команды над практически независимыми разделами и невнимательность проектировщиков ведут к дорогостоящим нестыковкам и коллизиям в проектах. Возможностью решения такой проблемы начали заниматься еще в 1970-х годах в Америке. Ученый Чарльз Истман предложил внедрение способа описания проекта в виде информационного хранилища данных, относящихся к проектированию, так называемую систему описания строительства BDS (Building Description System). Такая система положила начало стремительно развивающемуся на сегодняшний день информационному моделированию BIM [17].

Дальнейшее развитие информационного внедрения получило отклик на государственном уровне [18], а именно произошло образование Совета по строительной информации FIC (Facility Information Council), который с 2008 г. преобразовался в Национальный комитет Соединенных Штатов Америки по BIM стандартизации NBIMS-US PC (National BIM Standard-United States Project Committee).

В Российской Федерации заявления о BIM на уровне Правительства сделаны в 2017 г. Были введены первые своды правил по информационному моделированию, и ожидается появление национальных стандартов для каждого этапа жизненного цикла (ЖЦ) проекта. В 2018 г. Президент РФ В. Путин дал поручение Правительству создать условия для перехода всей строительной отрасли на цифровые технологии. В течение пяти лет ожидается рост доли объектов с применением BIM до 80 % от общего объема строительства, а для государственных структур использование информационных моделей станет обязательным [19, 20].

Идея такой BIM-стандартизации заключается в том, чтобы получить полное отображение всех характеристик проекта в информационном виде с возможностью их отслеживания в любой момент времени.

На всех фазах строительства — большое количество участников и у каждого из них свои интересы. Проявляются такие тенденции, как технологическое усложнение объектов, увеличение количества систем для реализации в рамках объекта и сокращение сроков строительства. Все это приводит к росту параллельных процессов, повышению стоимости ошибки и усложнению управления такими проектами. Возникает понимание, что традиционный подход последовательной реализации уже не срабатывает, и проектами необходимо управлять иначе [21]. Вместе с развитием IT возникла идея создания единого информационного пространства, объединяющего участников строительного процесса, которые смогут закладывать свои интересы и требования в проект. В рамках проекта будет формироваться информационная модель объекта, представляющая управляемую среду, к которой привязаны все необходимые данные. Для реализации BIM в полной мере должно быть две составляющие — софт и методология, задающая правила для взаимодействия участников. Идея заключается в том, что все участники объединены в рамках одной информационной модели, и эта модель меняется по мере реализации ЖЦ [22]. Это позволяет на ранней стадии оценить экономическую привлекательность объекта, стандартизировать процесс проектирования и сформировать библиотеки элементов для создания объемной модели. Инженерно-технические работники в свою очередь могут использовать эту модель для подсчета объемов работ при возведении объекта и эксплуатации.

С самого начала BIM-моделирование стремилось упростить весь процесс проектирования, сделать проект более полным, охватывая все его разделы и области. Сегодня уже существуют понятия 3D, 4D и 5D моделирования. Они отличаются полнотой охватываемой информации о проекте. Так,

первое представляет собой модель с геометрическими характеристиками, соответствующими проекту. Второе отличается от первого тем, что помимо трех взаимно перпендикулярных направлений плоскостей добавлена еще функция времени, которая привязывается к срокам строительства и позволяет увидеть весь ЖЦ проекта с детализацией требуемых этапов. Последнее, самое передовое моделирование учитывает организацию строительного процесса, к модели подключается смета и календарный план. Современное BIM-моделирование продолжает совершенствоваться, добавив к проекту расчеты инсоляции, анимации, текстуры и характеристики материалов, а также подбор строительных машин.

Упомянутым критериям выбора расчетного комплекса в полной мере соответствует ПК SOFiStiK. Его отличает двусторонняя связь с BIM-средой, широкая нормативная база и гибкий функционал. Последнее достигается благодаря открытому языку программирования CADINP. Используя текстовый ввод, можно решать практически любые пользовательские задачи, не ограничиваясь графическим интерфейсом.

Подытоживая вышесказанное, тема расчета конструкций на нестационарные нагрузки достаточно освещена, однако остается открытым вопрос автоматизации расчета на ударную нагрузку. Подходящим инструментом для решения задач может выступать программный комплекс ПК SOFiStiK.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики расчета предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку в ПК SOFiStiK.

Из поставленной цели вытекают задачи:

1. Описание методики моделирования предварительно напряженных конструкций в ПК SOFiStiK.
2. Описание методики задания динамической ударной нагрузки в ПК SOFiStiK.
3. Создание расчетной модели реального сооружения.
4. Анализ результатов расчета.

МЕТОДИКА

Описание расчетной схемы рассматриваемого сооружения

Для наглядного описания методики моделирования предварительного напряжения и расчета на ударную нагрузку рассмотрим железобетонное покрытие здания особого функционального назначения.

Конструктивная схема состоит из железобетонного покрытия и стен нижележащего этажа (рис. 1). Толщина покрытия составляет 400 мм. Балки покрытия имеют шаг 1800 мм, сечение 500 х 1100 мм. Общая длина сооружения — 66 600 мм, ширина — 27 400 мм.

К одной стороне покрытия приложены вес вентиляционной трубы и поддерживающего каркаса. Балки с этой стороны выполнены с применением предварительного напряжения. Граничные условия приняты в виде жесткой заделки стен.

Ударная нагрузка от падения самолета приложена к наиболее нагруженной стороне. Изменение величины нагрузки принято по графику для марки самолета Learjet 23 (рис. 2).

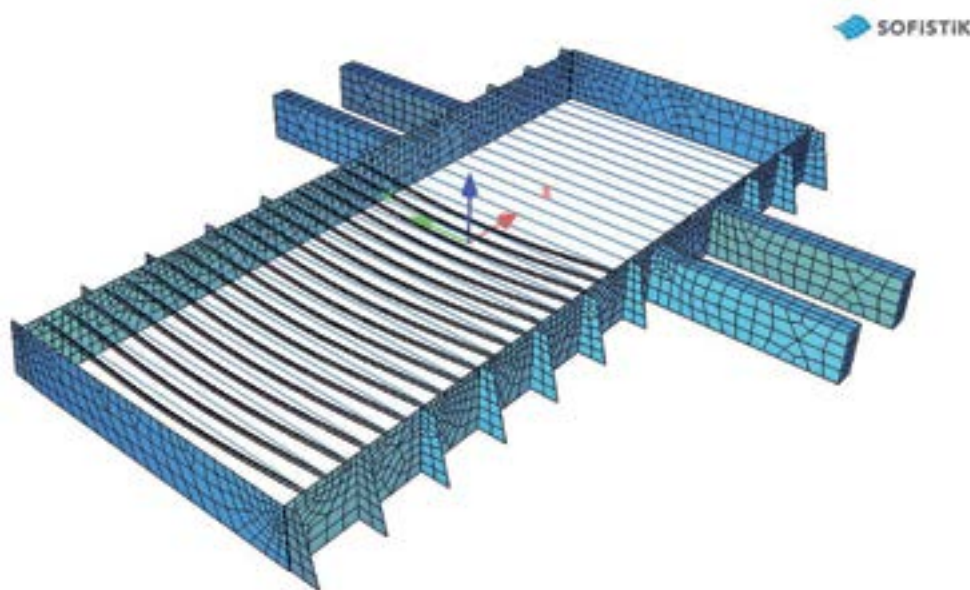


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Fig. 1. General view of the calculation model

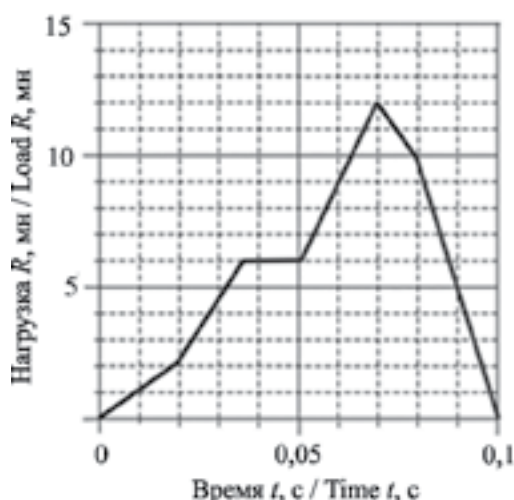


Рис. 2. Величина нагрузки Learjet 23

Fig. 2. Learjet 23 load value

Моделирование предварительного напряжения в ПК SOFiSTiK

Для создания расчетной схемы в ПК SOFiSTiK существует несколько препроцессоров. Один из них — SOFiPLUS, работает на основе AutoCAD и позволяет создавать конструктивные элементы при помощи привычных инструментов среды.

Интерфейс SOFiLPUS — доступное средство для создания конструкций с предварительным напряжением. Для оптимизации процесса непосредственному созданию схемы предшествует формирование систем преднапряжения. Инструмент

«Системы преднапряжения» состоит из нескольких вкладок:

- Nominal force (номинальная сила).
- Immediate Losses (немедленные потери).
- Duct Geometry (геометрия канала).

Системы с заданным набором параметров будут присваиваться конструкциям, что ускорит процесс создания расчетной схемы.

Вкладка Nominal force (рис. 3) посвящена вводу основных параметров натяжения:

- Prestressing steel — марка стали для изготовления канатов.
- Number of strands — число проволок. Напрягаемые элементы представляют собой канаты, состоящие в свою очередь из проволок.
- Strand area — площадь одной проволоки.
- Area per tendon — автоматически вычисляемое значение площади каната.

Далее представлен автоматический расчет допустимых напряжений:

- k_1 и k_2 — коэффициенты допуска, зависящие от нормативных документов;
- f_t , f_y — соответственно предел прочности и предел текучести применяемой стали. Напряжения умножаются на соответствующие коэффициенты допуска.

Согласно методике расчета программа выбирает наименьшее из полученных напряжений и умножает на вычисленную ранее площадь каната. Таким образом вычисляется допустимое усилие в канате.

SOFiSTiK Prestressing Systems

Number: 1 Name: AKS-13

Nominal force Immediate Losses Duct Geometry

Prestressing Steel: 3 1860 MPa

Number of strands: 13 Strand Area: 150 mm² Area per tendon, Az: 1950 mm²

Calculation of the maximum permissible force, $P_{0,max}$:

$k_1 = 0.800 \times f_t = 1860.00 \text{ MPa} = 1488.00 \text{ MPa}$

$k_2 = 0.900 \times f_y = 1850.00 \text{ MPa} = 1485.00 \text{ MPa}$

$\min(k_1 \cdot f_t, k_2 \cdot f_y) \times A_z = 2539.7 \text{ kN}$

Nominal force per Tendon, P_{0i} : 2539.0 kN

Informative calculation

Nominal force P_0 is the reference force for the prestress factors in the output.

Рис. 3. Основные параметры натяжения

Fig. 3. Basic tension parameters

В поле Nominal force per tendon пользователем должно быть введено фактическое усилие натяжения каната, не превышающее расчетное допустимое.

Вкладка Immediate Losses посвящена вычислению моментальных потерь напряжения. Данный

Табл. 1. Моментальные потери напряжения. Параметры

Table 1. Immediate losses. Parameters

Параметр / Parameter	Назначение / Function
Проскальзывание при посадке анкера / Anchor slip	Величина проскальзывания каната при посадке анкера / The value of the cable slip in the course of anchor placement
Коэффициент трения / Friction coefficient	Коэффициент трения каната о стенки канала / The coefficient of cable friction against the duct surface
Коэффициент отклонения / Wobble coefficient	Коэффициент отклонения каната от оси канала / The coefficient of cable deviation from the duct axis

тип потерь возникает в конструкции еще до передачи напряжения на бетон. Величина потерь зависит от следующих регулируемых факторов (табл. 1).

Вкладка Duct geometry посвящена описанию каналов для протяжки канатов. В зависимости от принятого типа канатов, следует выбирать каналы определенной геометрии. Редактированию подлежат следующие параметры (табл. 2).

Табл. 2. Геометрия канала. Параметры

Table 2. Duct geometry. Parameters

Параметр / Parameter	Назначение / Function
Внешний диаметр канала / Outer diameter of the duct	Внешний диаметр канала / Outer diameter of the duct
Максимальное отклонение от оси канала / Maximum eccentricity in the duct	Характеризует максимально допустимое значение отклонения от оси канала / Characterizes maximum acceptable eccentricity in the duct
Минимальный радиус кривизны канала / Minimum radius of the curvature	Характеризует допустимое значение кривизны канала / Characterizes acceptable duct curvature
Длина прямого участка / Straight length	Длина прямого участка в опорных точках / Straight length in control points

После формирования систем предварительного напряжения следует приступить к описанию геометрии напрягаемого элемента. Для этой задачи в зависимости от типа конструкции, содержащей предварительно напряженные элементы, доступны следующие инструменты: Beam PT, Shell PT и Slab

PT. Работая с балочными элементами, геометрию каната можно создать функцией Tendon (Draw) по нанесенным линиям AutoCAD.

В рассматриваемом проекте был применен альтернативный способ создания функцией PT Editor. Ее применение требует предварительного ввода опорных осей. Созданный канат повторяет геометрию оси в плане, но при этом доступны параметры для ввода отклонений по нескольким направлениям в контрольных точках. В зависимости от формы раскладки напрягаемой арматуры доступны два варианта: Spline Geometry, Polygonal Geometry. В первом варианте арматура будет иметь плавную раскладку, а соответственно во втором раскладка с такими же отклонениями будет представлена в виде прямых отрезков. Для балок покрытия была принята часто применяемая параболическая форма канатов (рис. 4).

Размещенным канатам помимо типа системы преднапряжения задаются их частные характеристики, которые можно разделить на несколько групп:

- Construction Sequence — группа свойств, определяющих технологическую последовательность монтажа напрягаемого элемента, его натяжения и экструзии канала раствором.
- Prestressing — группа свойств применяемой технологии натяжения, включая направление натяжения, число канатов в одном канале и описание процедуры анкеровки.

Также доступны дополнительные пользовательские настройки.

Сформированная с применением преднапряжения расчетная схема экспортируется в структурный рабочий стол SOFiSTiK (SSD) для дальнейшего приложения нагрузок, формирования комбинаций и вывода усилий.

Задание ударной нагрузки в ПК SOFiSTiK

Ударная нагрузка — нетипичное для программных комплексов воздействие, и при помощи пользовательского интерфейса расчет схем с таким типом воздействий невозможен. Для решения таких проблем ПК SOFiSTiK позволяет использовать внутренний язык программирования CADINP. Оболочка для ввода данных носит название TEDDY. Благодаря динамической справке нет необходимости запоминать всевозможные команды, достаточно лишь знать общую структуру ввода программного кода.

Как уже было сказано, ударная нагрузка относится к нестационарным воздействиям. Нестационарная нагрузка может быть задана функцией в дискретном виде. Для ввода нагрузок будет задействован модуль SOFiLOAD и его функции. Описание ударной нагрузки состоит из двух частей —

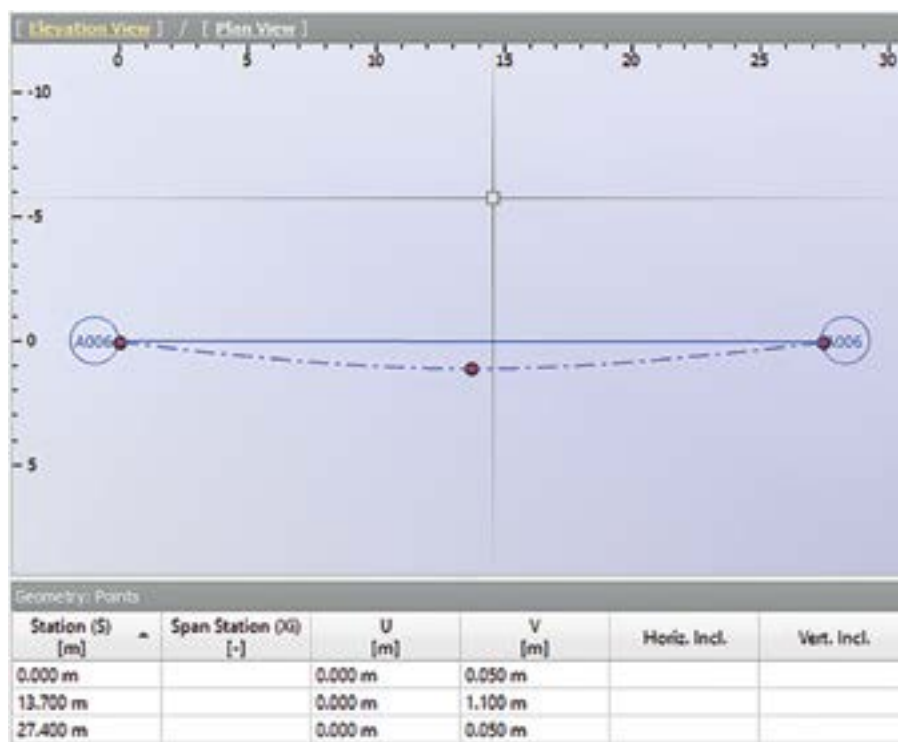


Рис. 4. Форма раскладки канатов

Fig. 4. Cable layout

приложения номинальной нагрузки и задания дискретных значений функции.

Первая часть осуществляется вызовом функции Quad. Ее запись включает место приложения нагрузки, направление и величину. Запись на рис. 5 обозначает приложение вектора нагрузки величиной 919 МН к группе элементов 100. Данная группа пластин покрытия была выбрана предварительно как место удара самолета.

```
LC 2 TYPE NONE;
quad grp 100 type pzz -919
quad grp 100 type pyy 919
```

Рис. 5. Функция Quad

Fig. 5. Quad function

Чтобы превратить статическую введенную нагрузку в нестационарную, применим команду FUNC. К вводу доступны параметр времени T и коэффициент включения нагрузки F (рис. 6). Описанию подлежат 11 временных интервалов от момента удара самолета до 0.1 с. В табличной форме каждому интервалу в соответствие ставится коэффициент силы.

Для решения задачи с дискретно заданной нагрузкой необходимо выполнить настройку процесса интегрирования функции. Подобные вычисления и динамический анализ выполняются за счет модуля DYNA (рис. 7). Для решения нашей задачи

```
FUNC T F
0 0;
0.01 0.083;
0.02 0.167;
0.03 0.375;
0.04 0.417;
0.05 0.417;
0.06 0.750;
0.07 1.000;
0.08 0.833;
0.09 0.417;
0.1 0
END
```

Рис. 6. Функция FUNC

Fig. 6. FUNC function

было принято интегрирование по методу Ньюмарка. Запись функции STEP означает разбиение области интегрирования на 1000 участков длиной 0.0001 с и вывода значений функции на каждом 100-м участке.

Стадии возведения сооружения и расчетные сочетания нагрузок

После создания расчетной схемы и описания нагрузок важным этапом описания задачи является описание стадий возведения сооружения. Данный аспект — особенно актуальный в силу применения систем с предварительным напряжением. Благода-

```
+PROG DYNA urs:15.2
HEAD Newmark method integration
CTRL OPT RLC +2
STEP N 1000 DT 0.0001 INT 100 THE 1.0
LC NO 2
```

Рис. 7. Фрагмент кода. DYNA

Fig. 7. Code snippet. DYNA

ря работе модуля CSM (Construction Stage Manager) возможно не только проанализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций на различных этапах возведения, но и рассчитать вторые потери предварительного напряжения. Причиной таких потерь становится усадка и ползучесть бетона, и учет их необходим. Аналитическое вычисление значений по нормативным документам производится с большим количеством допущений, что может привести к ошибкам при анализе работы конструкций.

Основные вкладки интерфейса CSM — это «Стадии», «Группы» и «Нагрузки». Вкладка «Стадии» описывает общие параметры этапов возведения, такие как длительность, тип воздействия, влажность и температура окружающей среды. В данной задаче созданы следующие стадии (табл. 3).

Табл. 3. Стадии. CSM

Table 3. Stages. CSM

Стадия / Stage	Назначение / Function
Собственный вес / Dead load	Активация собственного веса / Imposed dead load
Предварительное натяжение / Prestress	Натяжение канатов / Pre-stress of cables
Ползучесть 1 / Creep 1	Ползучесть до стадии эксплуатации / Creep at the pre-operation stage
Кровля / Roof	Активация длительных нагрузок на кровлю / Sustained loading of roofs
Ползучесть 2 / Creep 2	Ползучесть на стадии эксплуатации / Creep at the operation stage

Натяжение канатов согласно технологии постнатяжения производится после твердения бетона и соответственно после активации стадии собственного веса.

Активация длительных нагрузок на кровлю выделена в отдельную стадию. Это сделано для корректного разделения ползучести на этапы до и после ввода в эксплуатацию.

Вкладка «Группы» позволяет замоделировать процесс возведения конструкции. Но для решения данной задачи принята единовременная активация всех конструктивных элементов.

Вкладка «Нагрузки» описывает появление тех или иных воздействий в расчетной схеме, а также период их существования. Помимо особой нагрузки от удара самолета к покрытию приложены следующие длительные воздействия (табл. 4). Помимо указанных параметров возможна корректировка величины воздействия при помощи коэффициента включения.

Табл. 4. Нагрузки. CSM

Table 4. Loads. CSM

Воздействие / Loadcase	Стадия ввода нагрузки / First activation	Время действия / Active till
Вес кровли / Roof weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited
Вес металлического каркаса на кровле / Metal roof frame weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited
Вес дымовой трубы / Chimney weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited

Для выполнения расчета из заданных загружений необходимо сформировать расчетные сочетания нагрузок. Соответствующий инструмент называется Combination rules (рис. 8). Для анализа НДС рассматриваемого сооружения были сформированы сочетания для проверки по двум предельным состояниям. Следующий необходимый этап перед расчетом — формирование суперпозиций. В инструменте Superposition Commands выбору подлежат типы конструктивных элементов и виды внутренних усилий для расчета (рис. 9).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для графического вывода данных расчета применяется программный модуль WinGRAF. Графический модуль дает возможность представить усилия в элементах и перемещения узлов в наглядном виде. Возникающие внутренние моменты для наглядного отображения возможно представить в виде изополей и других альтернативных видах. Для анализа НДС конструкции выведены изополя внутренних моментов покрытия (рис. 10, 11) и перемещения узлов (рис. 12).

Полученные эпюры внутренних усилий могут быть использованы для конструирования армирования покрытий особого назначения. На основе изополей перемещений был получен график зависимости развития деформаций от ударной нагрузки. На график нанесены максимальные значения перемещений для каждого из 11 интервалов приложения нагрузки (рис. 13). Полученные данные соответствуют ожиданиям и в целом не противоречат инженерной

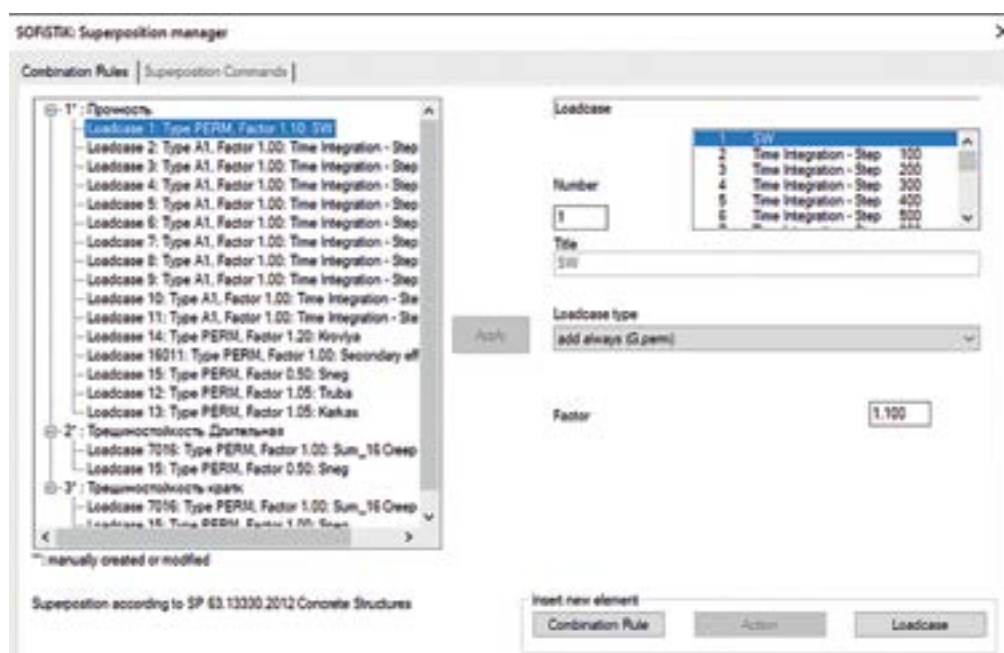


Рис. 8. Расчетные сочетания нагрузок

Fig. 8. Combination rules

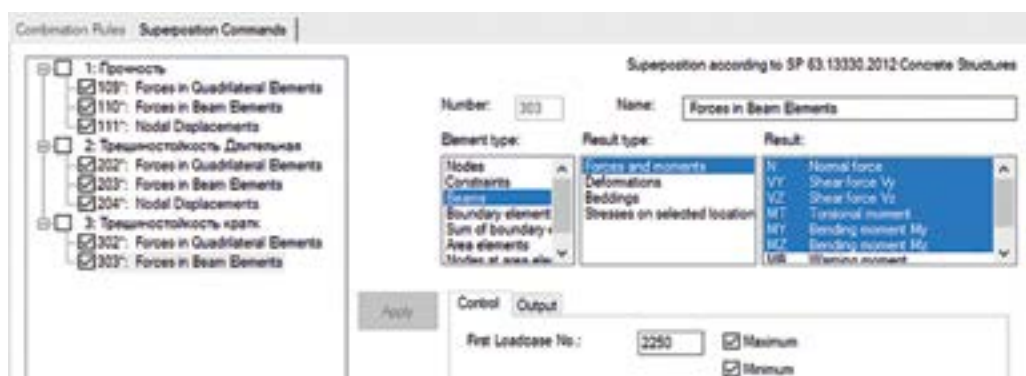


Рис. 9. Суперпозиции загрузений

Fig. 9. Superposition Commands

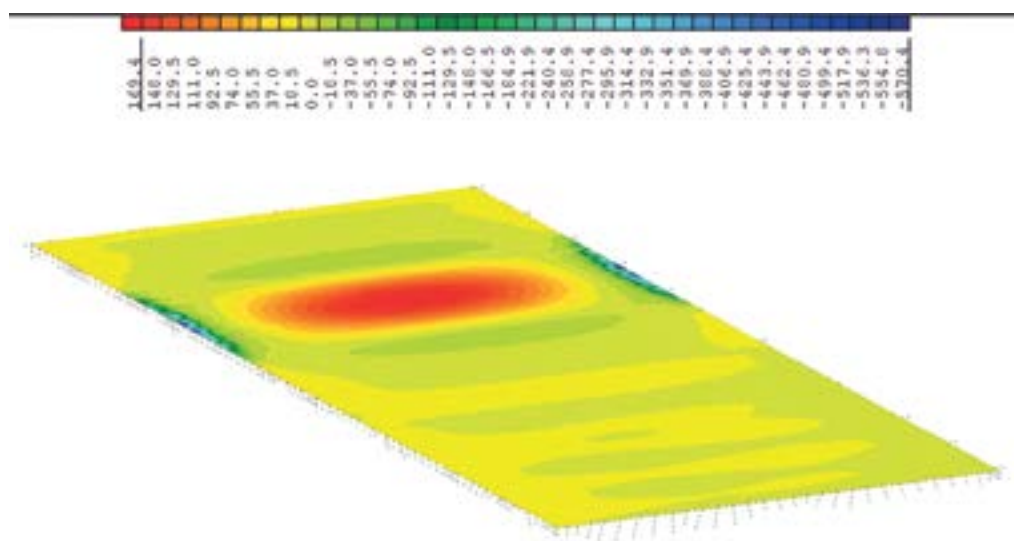


Рис. 10. Изополю внутренних моментов M_y

Fig. 10. Iso-area of bending moments M_y

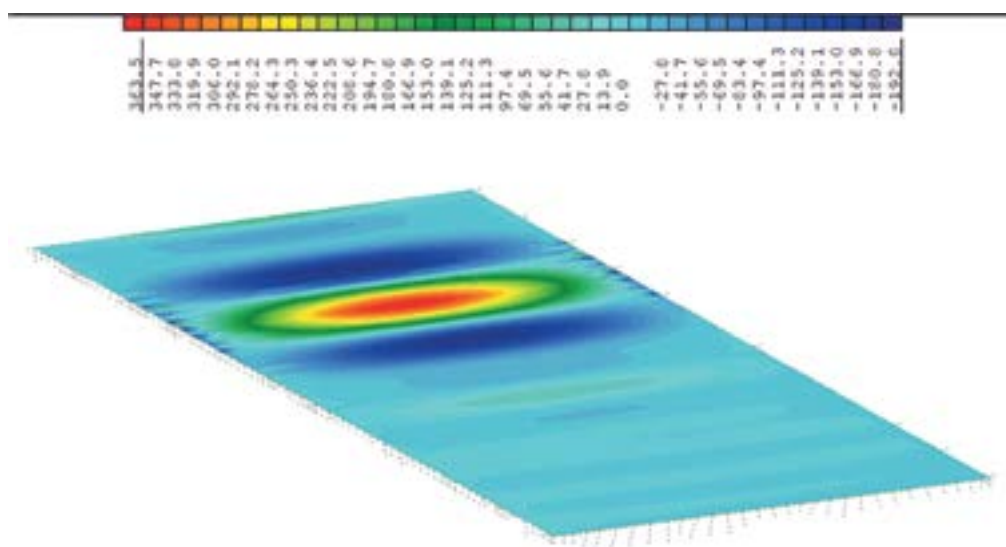


Рис. 11. Изополя внутренних моментов M_x

Fig. 11. Iso-area of bending moments M_x

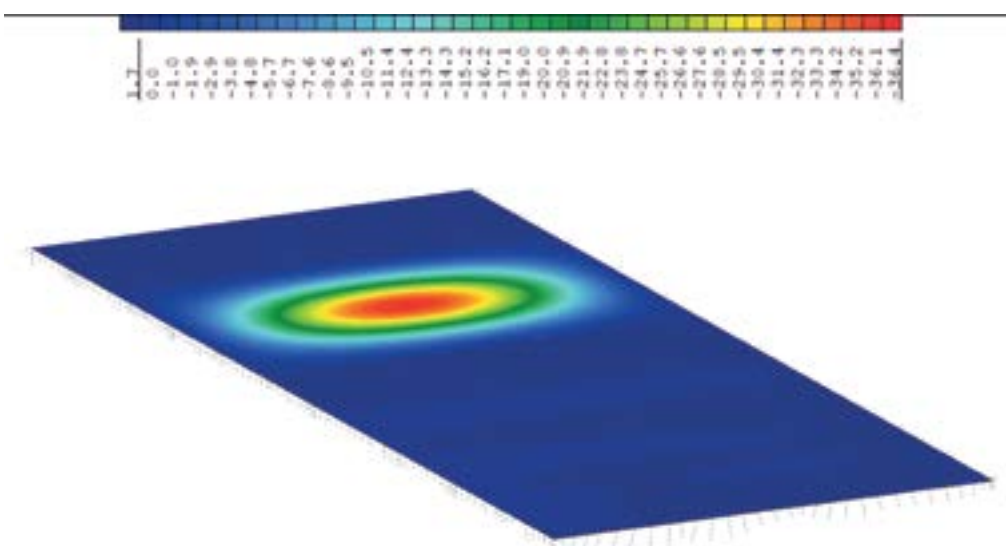


Рис. 12. Изополя перемещений узлов покрытия

Fig. 12. Iso-area of displacements of coating units

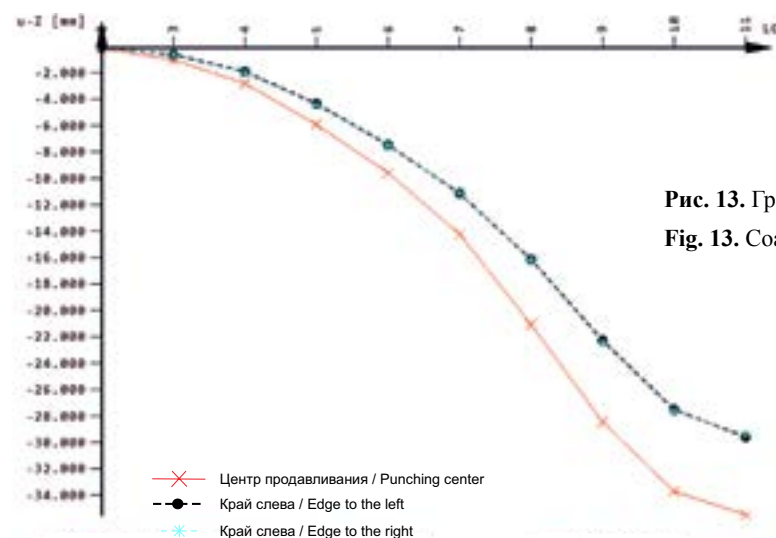


Рис. 13. График развития деформаций покрытия

Fig. 13. Coating strain graph

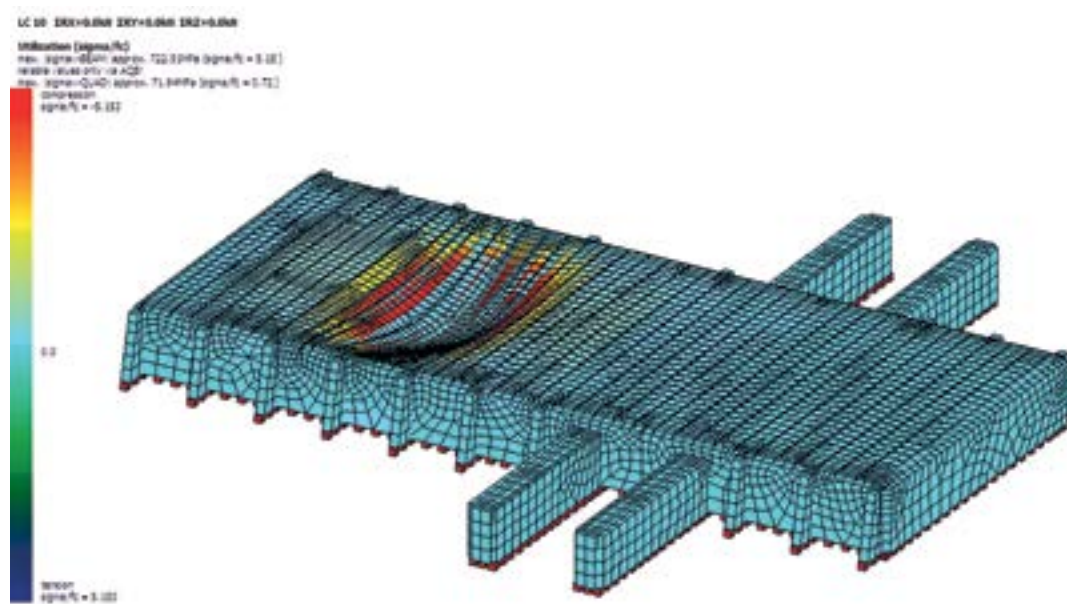


Рис. 14. Визуализация деформирования конструкции

Fig. 14. Structural deformation visualization

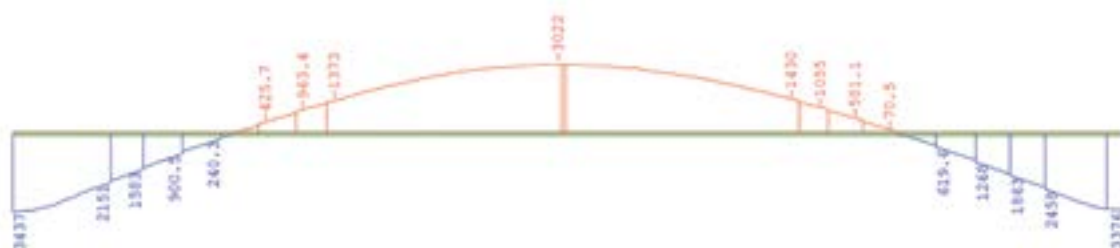


Рис. 15. Эпюра изгибающих моментов от воздействия предварительного напряжения

Fig. 15. Diagram of bending moments from the action of prestressing

логике. Значения перемещений узлов по краям зоны удара развивались одинаково, а максимальное значение смещения по вертикали для центральных узлов составило 36,4 мм. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» предельное допустимое значение прогиба перекрытия пролетом более 24 м вычисляется по формуле: $l/250$, где l — длина пролета. Для рассматриваемого сооружения $l = 27\,400$ мм, а допустимый прогиб соответственно $27\,400/250 = 109,6$ мм. Таким образом, расчетное значение прогиба покрытия не превышает нормативно допустимых.

Для общего понимания принципа работы конструкции модуль Animator позволяет увидеть анимированную объемную модель (рис. 14).

В ходе расчета предварительно напряженных балок перекрытия были вычислены усилия от натяжения канатов. В расчет усилий также входит расчет потерь напряжения, произведенный автоматически и в соответствии с нормативными документами.

На рис. 15 представлена эпюра моментов в балке покрытия от независимого воздействия предварительного напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере железобетонного ребристого предварительно напряженного покрытия пошагово описано моделирование и расчет на ударное воздействие в ПК SOFiStiK.

Время, затраченное на ввод систем предварительного напряжения, составило не более часа, а непосредственное создание конструкций происходило с высокой степенью автоматизации. Потери напряжения были вычислены автоматически и в соответствии с СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Стандартные методы моделирования таких конструкций требуют ручных расчетов потерь напряжения для каждого отдельно взятого элемента, выполняются со значи-

тельными допущениями и высокой трудоемкостью. Расчет в ПК SOFiStiK позволяет оценить НДС конструкции в любой момент времени, а также учесть стадийность возведения сооружения с учетом технологических особенностей монтажа конструкций с преднапряженной арматурой.

Для решения задачи по расчету на динамическое ударное воздействие был задействован язык программирования CADINP. Открытая и доступная пользователю структура кода демонстрирует гибкость программного комплекса для решения нестандартных инженерных задач. Из-за невозможности описания воздействия удара самолета конкретной функцией, расчет в классических программных комплексах не представляется возможным без значительных упрощений. В данном расчете результирующий код на CADINP занял не более 26 строчек кода, половина из которых являются стандартными и не

требуют изменений. В результате проведен временной анализ ударной нагрузки, а также сформирована суперпозиция результатов для дальнейшего анализа, подбора армирования и локальных проверок.

По результатам расчета был составлен график развития деформаций покрытия от удара самолета. Полученные данные будут использованы для проектирования сооружений особого назначения. Описанные способы расчета конструкций могут применяться при разработке оболочек атомных электростанций и других сооружений повышенной ответственности.

Принимая во внимание все указанное выше, можно характеризовать методику моделирования и расчета предварительно напряженных конструкций на ударное воздействие в ПК SOFiStiK как высокоэффективную, не трудоемкую и дающую точные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yao D., Jia J., Wu F., Yu F. Shear performance of prestressed ultra high strength concrete encased steel beams // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 52. Pp. 194–201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.006
2. Парфенов С.Г., Моргунов М.В. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения арматуры в железобетонных элементах из мелкозернистого бетона // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22. № 1. С. 112–117. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-112-117
3. Баранова Ю.А., Пушкарева В.О., Маношкина Г.В. Технология предварительного напряжения монолитного железобетона в построечных условиях (постнапряжение) // *Новые технологии в учебном процессе и производстве*. 2017. С. 76–78.
4. Peng H., Zhang J., Shang S., Liu Y., Cai C.S. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 127. Pp. 62–72. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.026
5. Рябенко Н.Д., Тур В.В. Установка для определения длины зоны передачи напряжений предварительно напряженной арматуры железобетонных элементов // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2017. № 16. С. 98–105.
6. Корчагина Е.И. Изучение методики расчета вспарушенных монолитных железобетонных плит перекрытий с предварительным напряжением арматуры // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса*. 2017. С. 281–283.
7. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М.: Изд-во АСВ, 2011. 247 с.
8. Rao B., Chen I., Fang Q., Hong J., Xiang H.B., Liu Z.X. Dynamic responses of reinforced concrete beams under double-end-initiated close-in explosion // *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. Issue 5. Pp. 527–539. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.024
9. Li Z., Liu Y., Yan J.B., Huang F.L., Yu W.L. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions // *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. Issue 5. Pp. 540–549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025
10. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load // *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2015. No. 1. Pp. 51–59.
11. Тяпин А.Г. Особенности расчета на сейсмические воздействия ответственных сооружений АЭС // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 5. С. 34–38.
12. Tymoshko A., Yugov A. Comparison of efficiency of LIRA 9.6 and SAP2000 program complexes in the dynamic calculation of high-rise object // *Metal constructions*. 2015. Vol. 21. No. 4. Pp. 207–216.
13. Клепов М.В., Иванов С.Ю. Учет демпфирования колебаний при динамических нагрузках в ПК «Лира» // *Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета*. 2019. С. 393–394.
14. Рахимов А.Р., Перцева О.Н. Анализ современного состояния BIM-технологии в строительной индустрии для моделирования нестационарных воздействий // *StudArctic Forum*. 2017. Т. 4. № 8 (8). С. 56–60. DOI: 10.15393/j102.art.2017.2201

15. Chen W., Hao H., Chen S. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading // *Materials & Design* (1980–2015). 2015. Vol. 65. Pp. 662–674. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.033

16. Завьялов И.С. Решение нелинейного динамического уравнения методом неупругого анализа // XXIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. 2019. 238 с.

17. Чжоу З.А. Использование плагинов в BIM-программах при проектировании элементов мостов // *Мир транспорта*. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 68–73.

18. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges // *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews. 2017. Vol. 75. Pp. 1046–1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083

19. Ревенков Е.Д. Внедрение BIM-технологий в промышленное и гражданское строительство в России // *Скиф. Вопросы студенческой науки*. 2018. № 8 (24). С. 155–158.

20. Анахин Н.Ю., Грошев Н.Г., Онопричук Д.А. Использование BIM-технологий в строительной отрасли России // *Поколение будущего*. 2018. С. 5–9.

21. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — literature review and future needs // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 38. Pp. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023

22. Scheffer M., Mattern H., König M. BIM project management. *Building Information Modeling*. 2018. Pp. 235–249. DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3_13

Поступила в редакцию 31 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Владимирович Лалин** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 536375, Scopus: 56091980300; vllalin@yandex.ru;

Ольга Николаевна Перцева — специалист отдела САПР; **ПСС ГРАЙТЕК**; 191040, г. Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 56-г; SPIN-code: 3534-3621, ORCID: 0000-0003-3185-2970; olya_perceva@mail.ru;

Владимир Рафаильевич Камалтдинов — специалист по расчетам строительных конструкций; **Институт технологий преднапряжения (ИТП)**; 117545, г. Москва, ул. Подольских курсантов, вл. 22, стр. 5; olya_perceva@mail.ru;

Глеб Вадимович Мартынов — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-code: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

Дарья Евгеньевна Монастырева — студентка; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 3376-6249; 02dm12@rambler.ru;

Роман Сергеевич Тихонов — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 5030-1678, ORCID: 0000-0002-9247-6537; tikhonovrs96@mail.ru.

REFERENCES

1. Yao D., Jia J., Wu F., Yu F. Shear performance of prestressed ultra-high strength concrete encased steel beams. *Construction and Building Materials*. 2014; 52:194-201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.006

2. Parfenov C.G., Morgunov M.V. Experimental investigations of the losses of prestressing in fine reinforced concrete elements. *Proceedings of the South-west State University*. 2018; 22(1):112-117. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-112-117 (rus.).

3. Baranova YU.A., Pushkareva V.O., Manoshkina G.V. Technology of prestressed of monolithic reinforced concrete in conditions of construction (post tension). *New technologies in the educational process and production*. 2017; 76-78. (rus.).

4. Peng H., Zhang J., Shang S., Liu Y., Cai C.S. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. *Engineering Structures*. 2016; 127:62-72. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.026

5. Ryabenko N.D., Tur V.V. Installation for determining the length of the stress transmission zone of prestressed reinforcement of reinforced concrete elements. *Bulletin of Polotsk State University*. 2017; 16:98-105. (rus.).
6. Korchagina E.I. Studying the calculation method of cracked monolithic reinforced concrete floor slabs with prestressing reinforcement. *Scientific support of the agro-industrial complex*. 2017; 281-283. (rus.).
7. Portaev D. *Calculation and design of monolithic prestressed structures of civil buildings*. Moscow, Publishing House Association of Construction Universities, 2011; 247. (rus.).
8. Rao B., Chen L., Fang Q., Hong J., Xiang H.B., Liu Z.X. Dynamic responses of reinforced concrete beams under double-end-initiated close-in explosion. *Defence Technology*. 2018; 14(5):527-539. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.024
9. Li Z., Liu Y., Yan J.B., Huang F.L., Yu W.L. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions. *Defence Technology*. 2018; 14(5):540-549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025
10. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2015; 1:51-59.
11. Tyapin A.G. Features of the seismic calculation of critical structures of nuclear power plants. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2014; 5:34-38. (rus.).
12. Tymoshko A., Yugov A. Comparison of efficiency of LIRA 9.6 and SAP2000 program complexes in the dynamic calculation of high-rise object. *Metal constructions*. 2015; 21(4):207-216.
13. Klepov M.V., Ivanov S.YU. Accounting for vibration damping under dynamic loads in the PC "Lira". *Review-competition of scientific, design and technological works of students of Volgograd State Technical University*. 2019; 393-394. (rus.).
14. Rahimov A.R., Pertseva O.N. Analysis of the current state of BIM-technology in the building industry for simulation of non-stationary loadings. *StudArctic Forum*. 2017; 4(8)(8):56-60. DOI: 10.15393/j102.art.2017.2201 (rus.).
15. Chen W., Hao H., Chen S. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading. *Materials & Design (1980-2015)*. 2015; 65:662-674. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.033
16. Zav'yalov I.S. The solution of a nonlinear dynamic equation by inelastic analysis. *XXIII regional conference of young researchers of the Volgograd region*. 2019; 238. (rus.).
17. Chzho Z.A. The use of plug-ins in BIM-programs for the design of bridge elements. *World of Transport*. 2018; 16(2)(75):68-73. (rus.).
18. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 75:1046-1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083
19. Revenkov E.D. Introduction of BIM technologies in industrial and civil engineering in Russia. *Skiff. Student Science Issues*. 2018; 8(24):155-158. (rus.).
20. Anahin N.Yu., Groshev N.G., Onoprijchuk D.A. The use of BIM-technologies in the construction industry of Russia. *Generation of the future*. 2018; 5-9. (rus.).
21. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*. 2014; 38:109-127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
22. Scheffer M., Mattern H., König M. *BIM project management*. Building Information Modeling. 2018; 235-249. DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3_13

Received October 31, 2019.

Adopted in a revised form on November 24, 2019.

Approved for publication March 29, 2020.

B I O N O T E S: **Vladimir V. Lalin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 536375, Scopus: 56091980300; vllalin@yandex.ru;

Olya N. Pertseva — CAD specialist; **PSS GRAITEC**; 56-g Ligovskiy prospekt, St. Petersburg, 191040, Russian Federation; SPIN-код: 3534-3621, ORCID: 0000-0003-3185-2970; olya_perceva@mail.ru;

Vladimir R. Kamaltdinov — specialist in design of civil engineering structures; **Institute of technology of prestressing**; pos. 22, build. 5, Podolsky cadets st., Moscow, 117545, Russian Federation; olya_perceva@mail.ru;

Gleb V. Martynov — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

Daria E. Monastyreva — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 3376-6249; 02dm12@rambler.ru;

Roman S. Tikhonov — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 5030-1678, ORCID: 0000-0002-9247-6537; tikhonovrs96@mail.ru.

Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии агрессивной среды

А.Н. Леонова, О.Д. Софьяников, И.А. Скрипкина

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены вопросы усиления металлических строительных конструкций системами внешнего армирования композитными материалами. Применение данных методов усиления в отечественной литературе и на практике исследовано не полностью. Актуально изучение особенностей усиления в условиях действия внешней агрессивной среды, а именно при воздействии гальванической коррозии, повышенных температур окружающей среды и экстремальных температур от огневых воздействий. Цель исследования — установить эффективность усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии различных силовых факторов, в том числе циклических нагрузок, и при действии внешней агрессивной среды.

Материалы и методы. Методологической основой послужил анализ публикаций отечественных и зарубежных ученых по теоретическому и практическому опыту применения композитных материалов для усиления металлических конструкций. При описании зависимостей физических величин от внешних и внутренних силовых и несиловых факторов использованы научные методы индукции, дедукции, обобщения и сравнения.

Результаты. Выполнено комплексное исследование эффективности применения композитных материалов для усиления металлических конструкций в агрессивной среде. Проанализирована зависимость прироста прочности усиленных стальных образцов от длины клеевого соединения внешнего армирования, изучена возможность усиления при усталостных напряжениях. Приведены рекомендации по применению защитных изолирующих систем и материалов, предотвращающих снижение несущей способности конструкций от внешних несиловых факторов.

Выводы. Выявлена эффективность усиления металлических конструкций с помощью композитных углепластиковых материалов. Несущая способность усиленных конструкций может быть увеличена на 59 %. При достижении температуры стеклования углепластиковых материалов прирост несущей способности от систем внешнего усиления уменьшается на 50 %, а при повышении температуры до 60 °С — системы внешнего усиления неэффективны и не повышают несущую способность. Для достижения требуемого показателя огнестойкости систем усиления, равного не менее одного часа, необходимо использовать внешнюю противопожарную изоляцию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, реконструкция, усиление металлических конструкций, композитные материалы, агрессивная среда, влияние температуры, коррозия, огнестойкость конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Леонова А.Н., Софьяников О.Д., Скрипкина И.А. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии агрессивной среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 496–509. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.496-509

Features of strengthening metal structures with composite materials under the influence of an aggressive environment

Anna N. Leonova, Oleg D. Sofyanikov, Irina A. Skripkina

Kuban State Technological University (KubSTU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article is devoted to the issues of reinforcing metal building structures with external reinforcement systems with composite materials. The application of these strengthening methods in domestic literature and in practice has not been fully studied. As a result, it is relevant to study the characteristics of strengthening under the action of an external aggressive environment, namely when exposed to galvanic corrosion, elevated ambient temperatures and extreme temperatures from firing. The purpose of the study is to establish the effectiveness of reinforcing metal structures with composite materials under the influence of various force factors, including cyclic loads, and under the action of an external aggressive environment.

Materials and methods. The methodological basis of scientific research was the analysis of publications of domestic and foreign scientists on the theoretical and practical experience of using composite materials to strengthen metal structures. During the study, when describing the dependences of physical quantities on external and internal force and non-force factors, scientific methods of induction, deduction, generalization and comparison were used.

Results. Performed a comprehensive study of the effectiveness of the use of composite materials to enhance the metal structures in hostile environments. The dependence of the increase in strength of reinforced steel samples on the length of the adhesive joint of external reinforcement is analyzed, the possibility of applying reinforcement at fatigue stresses is investigated. Recommendations on the use of protective insulating systems and materials that prevent the reduction of the bearing capacity of structures from external non-force factors are given.

Conclusions. The effectiveness of reinforcing metal structures using composite carbon fiber materials is revealed. The bearing capacity of reinforced structures may be increased by 59 %. When the glass transition temperature of carbon fiber materials is reached, the increase in the bearing capacity from external amplification systems decreases by 50 %, and when the temperature is increased to 60 °C, the external amplification systems are ineffective and do not increase the bearing capacity. To achieve the required fire resistance of the amplification systems, equal to at least one hour, it is necessary to use external fire insulation.

KEYWORDS: construction, reconstruction, reinforcement of metal structures, composite materials, aggressive environment, temperature effects, corrosion, fire resistance of structures

FOR CITATION: Leonova A.N., Sofyanikov O.D., Skripkina I.A. Features of strengthening metal structures with composite materials under the influence of an aggressive environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):496-509. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.496-509 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Использование металлических конструкций при строительстве зданий и сооружений промышленного, гражданского и транспортного назначения в последнее время значительно возросло. Помимо этого, ввиду постоянного развития производства, актуальным является проведение реконструкции и технического перевооружения промышленных зданий с металлическим каркасом с целью продления жизненного цикла и приведения строительных конструкций в соответствие с требованиями современных нормативных документов.

Металлические конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию силовых нагрузок (в том числе циклических нагрузок, вызывающих усталостные разрушения конструкций), повышенных и экстремальных температур, агрессивной окружающей среды (в том числе коррозионного износа), в результате чего несущая способность зданий и сооружений снижается, а долговечность сокращается.

Одним из способов восстановления и повышения несущей способности строительных конструкций является их усиление. Традиционные способы усиления с использованием железобетонных и металлических элементов содержат множество недостатков, таких как выключение строительных конструкций из эксплуатации, значительное увеличение собственного веса и размеров усиливаемых конструкций, вследствие чего уменьшается свободная площадь помещений, большой объем сварочных работ, возникновение дополнительных деформаций конструкций.

Было проведено исследование [1] работы арматуры из композитных полимерных материалов для

возведения новых строительных железобетонных конструкций, а в труде [2] изучены способы и особенности усиления строительных железобетонных конструкций изделиями из композитных полимерных материалов при реконструкции эксплуатируемых зданий.

Для усиления металлических конструкций также широко используются композитные полимерные материалы. По сравнению с другими конструкционными материалами, такими как алюминий и сталь, композитные полимерные материалы (на основе углеродного волокна) обладают экстремально высокими и уникальными характеристиками — прочностью, сопротивлением усталости, модулем упругости, термической, химической и коррозионной стойкостью, в разы превышающими аналогичные показатели стали при существенно меньшей массе.

Для изучения возможности применения композитных полимерных материалов при усилении металлических строительных конструкций рассмотрим ряд экспериментальных исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой научного исследования послужил анализ публикаций отечественных и зарубежных ученых по теоретическому и практическому опыту применения композитных материалов для усиления металлических конструкций. В ходе исследования при описании зависимостей физических величин от внешних и внутренних силовых и несиловых факторов были использованы научные методы индукции, дедукции, обобщения и сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Усиление металлических конструкций композитными полимерными материалами

Различные металлические конструкции (фермы, рамы, опорные системы, эстакадные конструкции и т.д.) представляют собой сочетание тонкостенных стержневых, пластинчатых и оболочечных элементов, работающих на растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Поэтому усиление этих сложных, на первый взгляд, конструкций сводится к усилению составляющих их металлических элементов — стержней, работающих на растяжение-сжатие; балок, работающих на изгиб; элементов, работающих на сдвиг, и пластинчатых или оболочечных элементов, работающих чаще всего на двухосное растяжение [3].

Помимо этого, могут быть усилены сталебетонные конструкции, например, монолитные сталебетонные перекрытия, где в качестве элементов несъемной опалубки и одновременно несущих конструкций используются металлические балки [4, 5].

Внешнее усиление представляет собой наклейку высокопрочных холстов или ламинатов из композитных материалов с их последующим отверждением на поверхность металлических конструкций. Холсты и ламинаты состоят из слоя адгезива, обеспечивающего клеевое соединение с основанием усиливаемой конструкции, однослойного или многослойного композитного материала и защитного слоя, который выполняет защиту системы от действия внешней агрессивной среды.

Современный строительный рынок предлагает огромный выбор вышеуказанных материалов. Однако наибольшей популярностью пользуются материалы на основе углеродных волокон. Это можно объяснить тем, что такие материалы обладают более высокими физико-механическими свойствами, чем материалы, армированные арамидными или стеклянными волокнами [6].

В работе [7] выполнены экспериментальные исследования клеевого соединения элементов из

стали и углепластиковых композитных материалов в лаборатории НИУ МГСУ. Образцы, конструкция которых изображена на рис. 1, состояли из двух стальных пластин шириной 55 мм и толщиной 12 мм, марка стали — С245. В качестве клеевого состава использовали FibArm Resin Laminate+, изделия на основе углеродных волокон — ламели FibArm Lamel-12/50 шириной 25 мм и толщиной 1,2 мм. Предварительно были испытаны образцы ламелей из углеродных волокон для определения фактических характеристик. Прочность углеродного композита составила 2300 МПа. При напряжениях в первом образце 759 МПа по данным экстензометра модуль упругости на начальном участке составил $2,34 \times 10^5$ МПа, во втором образце при 730 МПа по данным тензорезистора — $1,71 \times 10^5$ МПа.

Следовательно, при напряжениях в углеродном композите FibArm Lamel-12/50, соответствующих пределу текучести высокопрочной стали, его модуль упругости близок к модулю упругости стали. Результаты испытания изображены на рис. 2.

Выполнено экспериментальное исследование прочности клеевого соединения ламели со стальными элементами. Использованы четыре типа образцов с длиной композитных ламелей 380; 435; 595; 660 мм и длиной клеевого соединения с двух сторон 170; 200; 280 и 310 мм соответственно. Согласно полученной зависимости «нагрузка — деформация», изображенной на рис. 3, при увеличении длины клеевого соединения на 82 % несущая способность образцов, определенная по условному пределу текучести, в среднем увеличилась на 71 %. При разрушении образцы типа 380 имели среднюю деформацию 0,53 %, а образцы типа 660 — 0,26 %, что говорит об увеличении жесткости образцов в 2 раза.

Испытания показали, что разрушение всех образцов происходило по клеевому соединению, несмотря на формально большую прочность при большей длине клеевого соединения. При этом уровень напряжений в ламелях при разрушении составил лишь 28–32 % прочности углеродного композита. Это говорит о нерациональном использовании угле-

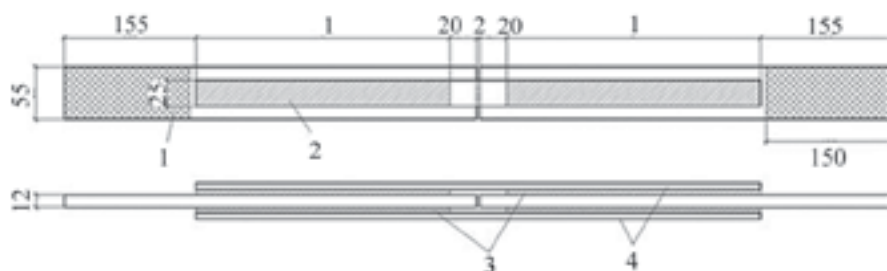


Рис. 1. Образец для испытания клеевого соединения: 1 — зона захвата зажимами; 2 — участок приклеивания композита; 3 — клей; 4 — углеродный композит

Fig. 1. Sample for testing the adhesive bond: 1 — clamping area; 2 — composite bonding area; 3 — adhesive; 4 — carbon composite

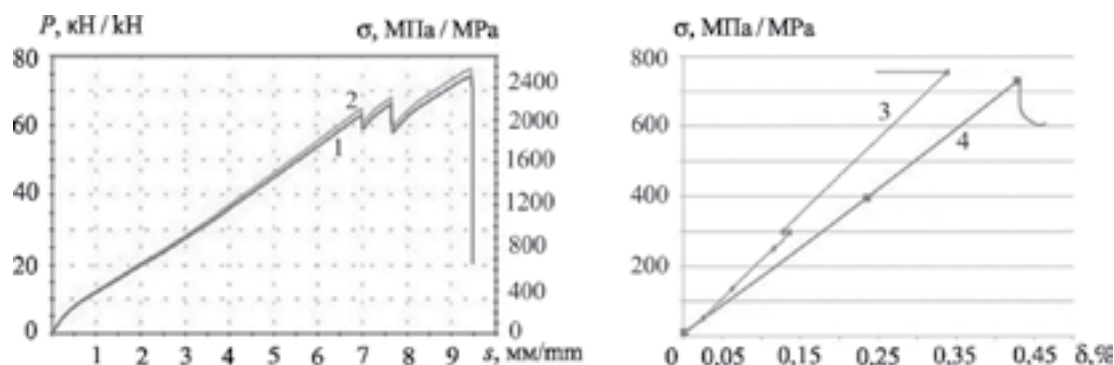


Рис. 2. Результаты предварительного испытания ламели из углеродных волокон: 1 — кривая «нагрузка — перемещение» образцов; 2 — кривая «напряжения — перемещение» образцов; 3 — зависимость «напряжение — деформация» по данным экстензометра; 4 — то же, по данным тензорезистора

Fig. 2. Results of preliminary testing of carbon fiber lamellas: 1 — “load — displacement” curve of samples; 2 — stress-displacement curve of samples; 3 — dependence “stress — strain” according to the extensometer; 4 — the same, according to the strain gauge

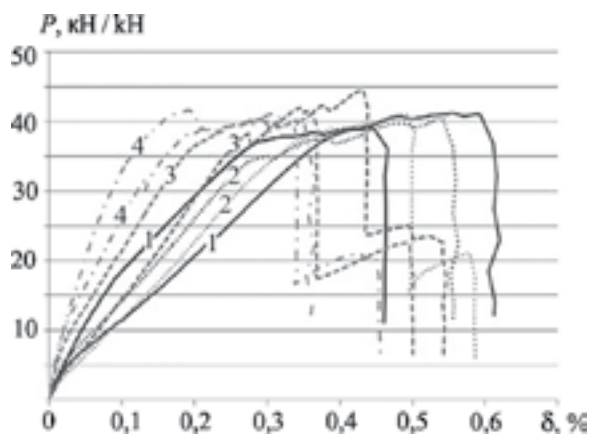


Рис. 3. Зависимость «нагрузка — деформация» при длине клеевого соединения: 1 — 170 мм; 2 — 200 мм; 3 — 280 мм; 4 — 310 мм

Fig. 3. Dependence “load — strain” with the length of the adhesive bond: 1 — 170 mm; 2 — 200 mm; 3 — 280 mm; 4 — 310 mm

пластиковых ламелей и необходимости дополнительного закрепления клеевого соединения.

В работе [8] проведены экспериментальные исследования стальных конструкций, работающих на

растяжение, с усилением углепластиковыми ламелями. Конструкция образцов, показанная на рис. 4, имеет предпосылки к разрушению в средней части. Были использованы стальные пластины класса С245, углепластиковые ламели FibArm Lamel-12/50 и двухкомпонентный клей FibArm Resin Laminate+.

Среди результатов испытания получена зависимость «нагрузка — перемещение» для стальных образцов без усиления и образцов с усилением углепластиковыми ламелями, которая приведена на рис. 5.

Согласно данной зависимости, выявлен линейный участок, на котором работа стального образца совпадает с графиком работы усиленного образца. При нагрузке 134 кН сталь достигает предела текучести и развиваются пластические деформации в образцах. Увеличение растягивающих нагрузок продолжалось до разрушения клеевого соединения образцов, далее нагрузка на образец резко падала до значений, соответствующих площадке текучести стали. Затем наблюдалась стадия самоупрочнения при быстром росте деформаций, а при нагрузке до 213 кН происходило разрушение образца.

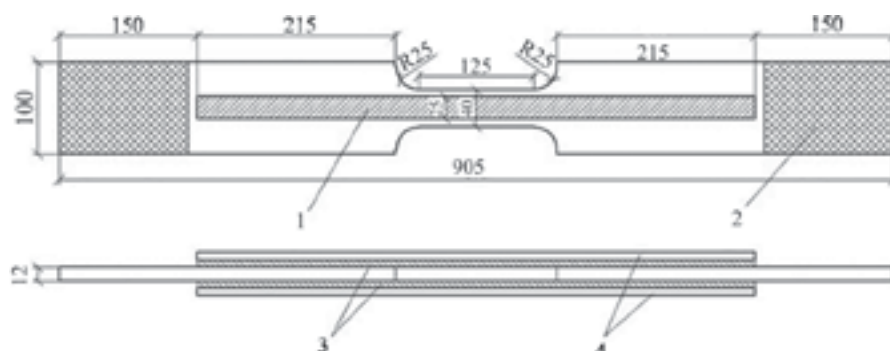


Рис. 4. Образец для испытания на растяжение: 1 — участок приклеивания композита; 2 — зона захвата зажимами; 3 — клей; 4 — углеродный композит

Fig. 4. Sample for tensile test: 1 — composite bonding area; 2 — clamping area; 3 — adhesive; 4 — carbon composite

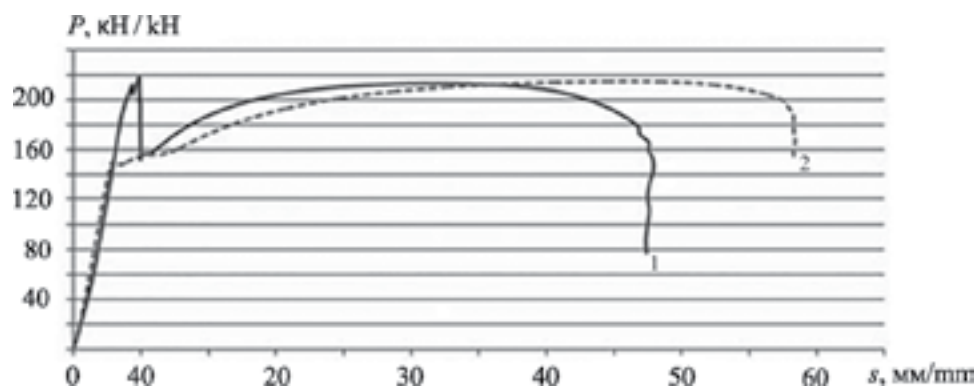


Рис. 5. Кривая «нагрузка — перемещение» стальных образцов на растяжение: 1 — усиленные углепластиковыми ламелями; 2 — без усиления

Fig. 5. “Load — displacement” curve of steel samples for tensile test: 1 — reinforced with carbon fiber lamellas; 2 — without strengthening

Прочность усиленного образца оказалась на 59 % больше прочности стального элемента, определенной по пределу текучести. Следовательно, экспериментальные исследования подтвердили эффективность усиления металлических образцов с помощью композитных углепластиковых материалов.

В статье [9] описано исследование работы стальных балок с внешним усилением композитными углепластиковыми материалами на четырехточечный изгиб. Как и в случае работы усиленных металлических конструкций на растяжение, разрушение образцов на четырехточечный изгиб происходило при отслоении углепластика по клеевому контакту со стальной балкой.

Группа зарубежных ученых в труде [10] выполнила испытание стальных балок, усиленных композитными углепластиковыми материалами, на действие усталостных напряжений. Испытание проводилось с помощью установки MTS-810, состоящей из верхней опорной рамы и нижней загрузочной балки, с использованием четырехточечной схемы приложения нагрузки, проиллюстрированной на рис. 6.

С двух сторон установки применялись фиксаторы для предотвращения изменения положения испытуемого образца. В точках приложения нагрузки использовались четыре колеса-опоры, свободно вращающихся во время испытания на усталостное разрушение.

Для моделирования фактического повреждения, вызванного расширением усталостных трещин, исследователи преднамеренно выполнили выемку, работающую как концентратор напряжений, в середине пролета испытываемой стальной балки.

Все образцы восстанавливали методом сварки. Часть образцов дополнительно усиливали композитными углепластиковыми пластинами и листами с применением клеевого соединения. Результатом испытания образцов в условиях циклических нагрузок является диаграмма со средними значениями, приведенная на рис. 7.

Было отмечено, что система усиления углепластиковыми изделиями может увеличить усталостную прочность стальных балок более чем в три раза по сравнению с балками, отремонтированными только методом сварки. Помимо этого, система

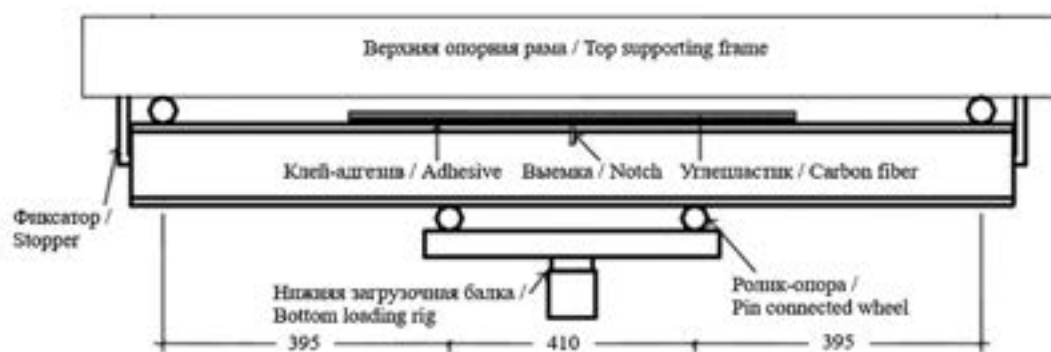


Рис. 6. Установка испытания на усталостное разрушение

Fig. 6. Fatigue failure test setup

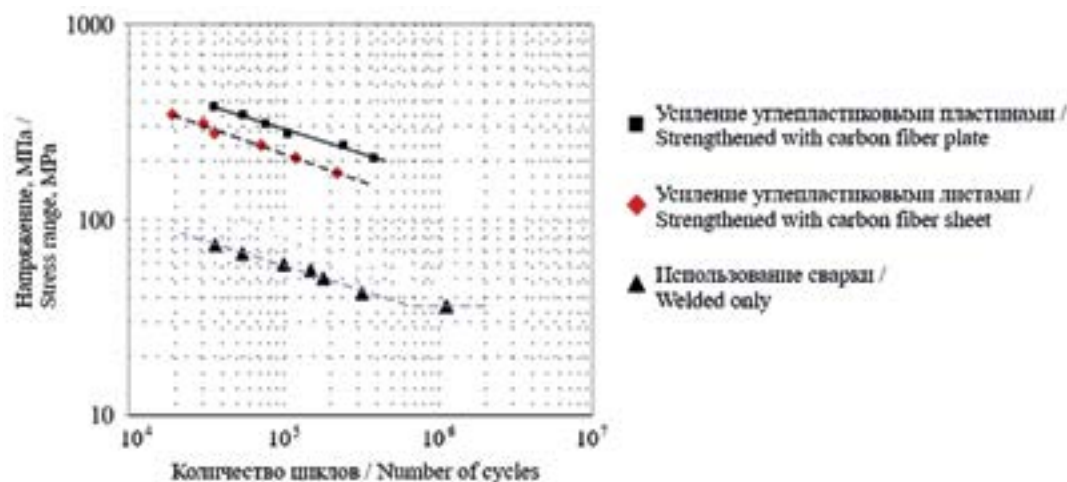


Рис. 7. Зависимость «напряжение — количество циклов» образцов на усталостное разрушение

Fig. 7. Dependence “stress — number of cycles” of the samples for fatigue failure

усиления композитными материалами позволила не только уменьшить скорость роста трещины в балке, но и выдержать несколько дополнительных циклов нагрузки после полного растрескивания натяжного фланца.

Далее рассмотрим, в каких условиях внешней агрессивной среды возможно усиление изделиями из композитных полимерных материалов и как изменяются физико-механические свойства усиливаемых металлических конструкций.

Влияние действия внешней агрессивной среды на металлические конструкции с усилением композитными полимерными материалами

Влияние гальванической коррозии

Надежность соединения композитных полимерных изделий напрямую зависит от качества обработки поверхности усиливаемых элементов металлических конструкций для приклеивания.

Комплекс работ по подготовке поверхности состоит из удаления имеющегося покрытия, шлака

и других продуктов коррозии с конструкции, обезжиривания растворителем, абразивной пескоструйной очистки, сушки поверхности, химического травления, нанесения праймера и заполнения неровностей.

Коррозионное разрушение элементов стальных конструкций является основным фактором, приводящим к аварийному состоянию конструкций, потере работоспособности и снижению долговечности [11].

Несмотря на то что углепластик — нержавеющий материал, когда углеродные волокна находятся в контакте со сталью, они могут образовывать гальванический элемент. Для повышения прочности элементов стальных конструкций и прочности углепластиковых материалов крайне необходимо предотвращение гальванической коррозии. Это может быть достигнуто путем изолирования различных металлов друг от друга или путем предотвращения непрерывной связи электролитического раствора между ними посредством нанесения стойкого герметика [12].

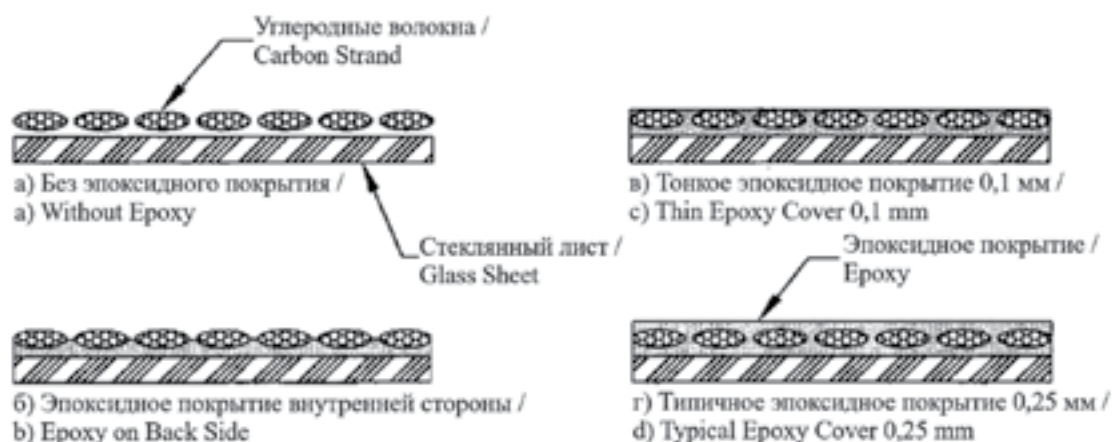


Рис. 8. Углеродные композитные образцы для исследования гальванической коррозии

Fig. 8. Carbon composite samples for galvanic corrosion research

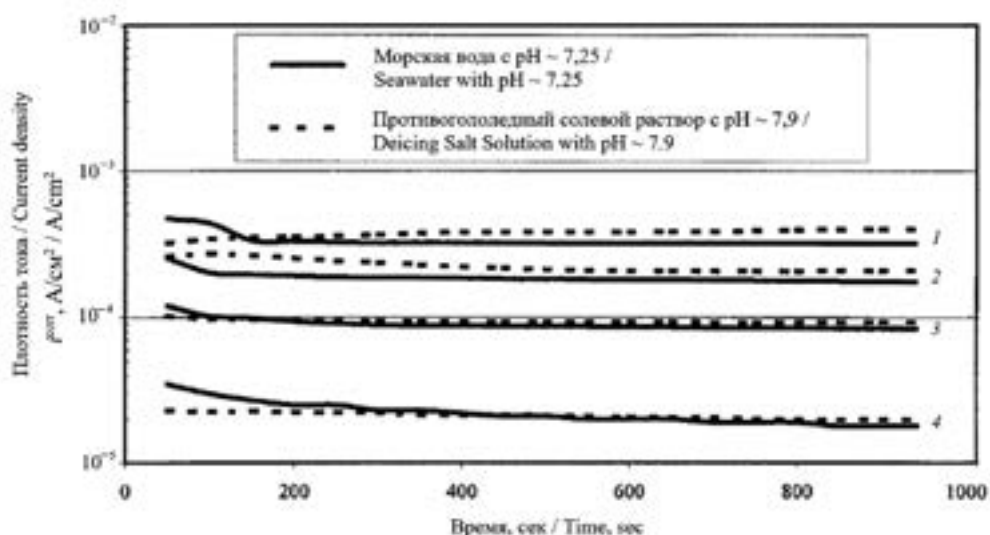


Рис. 9. Результаты испытания гальванического соединения образцов: 1 — без эпоксидного покрытия; 2 — эпоксидное покрытие внутренней стороны; 3 — тонкое эпоксидное покрытие 0,1 мм; 4 — типичное эпоксидное покрытие 0,25 мм
Fig. 9. Results galvanic connection test of samples: 1 — without epoxy; 2 — epoxy on back side; 3 — thin epoxy cover 0,1 mm; 4 — typical epoxy cover 0,25 mm

В работах зарубежных ученых [13–15] изучена гальваническая коррозия при контакте между углеродными композитными материалами и сталью.

Рассмотренные варианты эпоксидного покрытия приведены на рис. 8. Рекомендуется также использование клеевых составов с высокими изоляционными свойствами, водостойкого слоя герметика или сочетания клеевого слоя и герметика.

Согласно графической зависимости, изображенной на рис. 9, скорость гальванической коррозии напрямую связана с толщиной защитного слоя из эпоксидной смолы. При толщине слоя 0,1 мм скорость процессов коррозионного разрушения уменьшилась в таких электролитах, как морская вода и солевой раствор, соответственно в 7 и 5 раз, при использовании более толстого эпоксидного покрытия — 0,25 мм, скорость гальванической коррозии уменьшилась соответственно в 21 и 23 раза.

В работах [16, 17] рассмотрены способы усиления металлических строительных конструкций композитными углепластиковыми материалами при воздействии коррозии. Для усиления стальных колонн предложен способ устройства открытой оболочки из углепластиковых материалов с последующим заполнением легким бетоном, а для усиления стальных балок мостовых конструкций — устройство внешнего армирования поясов балок.

Следовательно, применение композитных углепластиковых материалов в качестве систем внешнего усиления металлических конструкций возможно в условиях действия агрессивных сред, вызывающих коррозию, как в гражданском и промышленном, так и в мостовом строительстве.

Влияние повышенной температуры окружающей среды

Металлические конструкции и композитные полимерные материалы особенно чувствительны к высокой температуре окружающей среды. Прочность и жесткость композитных изделий при достижении температуры стеклования (температуры плавления) резко снижается, нарушаются клеевое соединение и сцепление с поверхностью усиливаемых конструкций.

Для значений температур, характерных для промышленных и гражданских инженерных конструкций, нежелательных эффектов можно избежать подбором композитных материалов, в которых температура стеклования всегда выше, чем максимальная рабочая температура конструкции или усиливаемого элемента [18].

Автор труда [19] изучил влияние температуры на стальные балки, усиленные внешним армированием из углепластиковых композитных материалов.

Следует отметить, что испытания проводились при температурах до 60 °С, а предел текучести и модуль упругости стали снижаются при температуре свыше 100 °С. Следовательно, влияние температуры на стальные элементы в ходе исследования можно игнорировать.

Выполнены предварительные испытания на растяжение образцов композитных углепластиковых пластин (Exel Composites Ltd) и ламинатов MTM 46/STS, а также изготовленных в лаборатории образцов из адгезивного клеевого материала Sikadur-30. Результаты испытаний приведены на рис. 10 и 11.

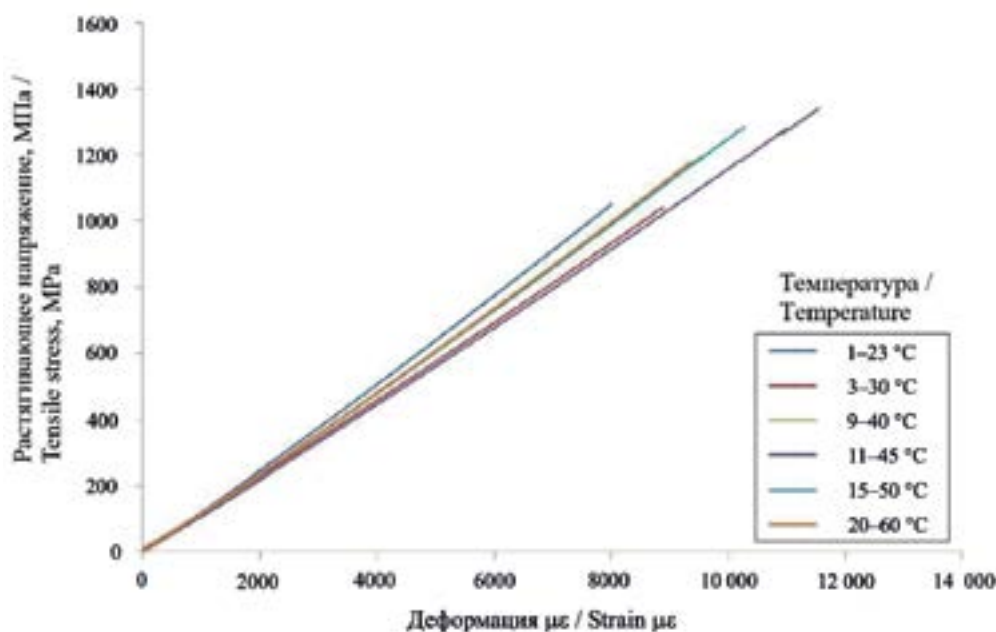


Рис. 10. Испытание углепластиковых образцов на растяжение при повышенной температуре

Fig. 10. Tensile testing of carbon fiber samples at elevated temperature

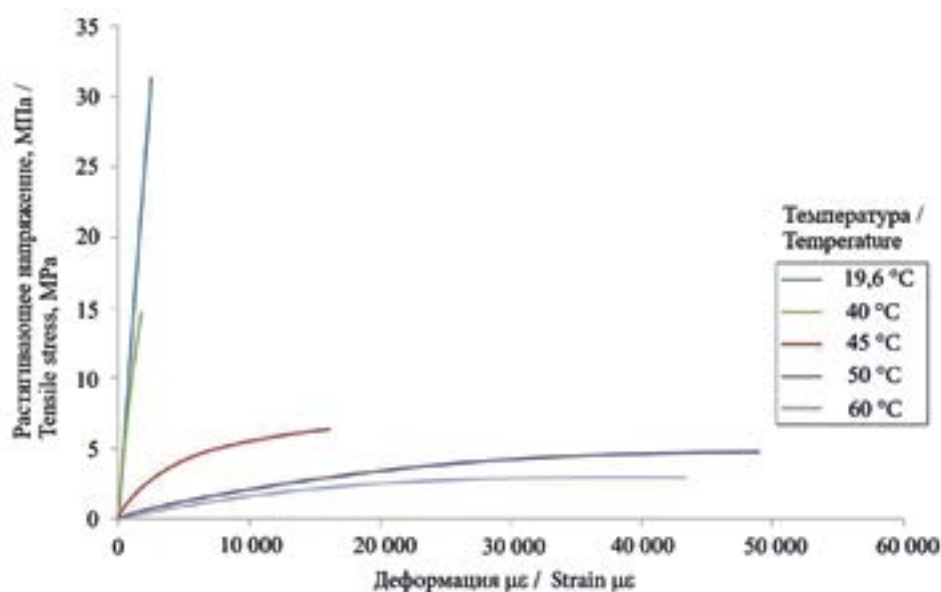


Рис. 11. Испытание образцов из адгезивного материала на растяжение при повышенной температуре

Fig. 11. Tensile testing of samples of adhesive material at elevated temperature

Воздействие высокой температуры может смягчить матрицу смолы в композитном углепластиковом изделии. Однако используемая в исследовании эпоксидная матрица имела температуру размягчения 190 °C, таким образом механические свойства углепластика при температуре 60 °C не были нарушены. Адгезивный клеевой материал показал значительное снижение прочности при достижении температуры стеклования, равной по результатам данного испытания 43 ± 1 °C.

Выполнено испытание на трехточечный изгиб стальных двутавровых балок, растянутый пояс которых усилен композитными углепластиковыми пластинами толщиной 3,3 мм и длиной 700 мм в середине пролета. Схема установки испытания на трехточечный изгиб изображена на рис. 12.

Для проведения испытания при повышенных температурах от 20 до 60 °C была использована температурная камера. Образцы нагревали до нужной температуры и выдерживали в течение 45 мин для

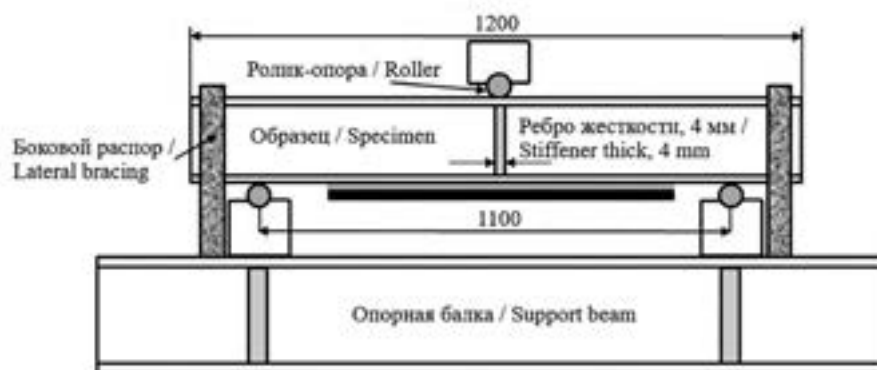


Рис. 12. Установка испытания на трехточечный изгиб при повышенной температуре

Fig. 12. Installation of a three-point bend test at elevated temperature

достижения равномерного распределения температуры вдоль всей балки. Результаты испытания представлены на рис. 13.

Согласно результатам испытания, несущая способность двутавровых балок, усиленных углепластиковыми пластинами, увеличилась на 35 % в стандартных температурных условиях, однако при повышении температуры эффективность усиления уменьшалась. Полная потеря эффекта от внешнего армирования достигнута при 60 °С, и кривая «нагрузка — прогиб» балки с усилением стала похожа на кривую неусиленной балки.

Влияние экстремальных температур при огневых воздействиях

Полученные результаты испытаний при повышенных температурных воздействиях до 60 °С недостаточны. Применение внешнего усиления из композитных углепластиковых изделий ограничено противопожарными нормами проектирования, ввиду возможных экстремально высоких температур

огневого воздействия на строительные металлические конструкции.

Во время воздействия огня механические свойства композитных материалов систем внешнего усиления металлических конструкций могут быть улучшены путем применения систем противопожарных защитных покрытий, способствующих предотвращению распространения пламени и выделения дыма.

В работе [20] исследователи провели оценку огнестойкости металлических конструкций, усиленных углепластиковыми изделиями. На рис. 14 приведена кривая изменения температуры в адгезивном клеевом слое системы внешнего усиления стального двутаврового профиля и ее сравнение со стандартной кривой возгорания при пожаре.

При возникновении пожара разница температур между окружающей средой и внешней системой усиления углепластиковыми материалами составляла 45 %, однако уже через 150 секунд эта разница

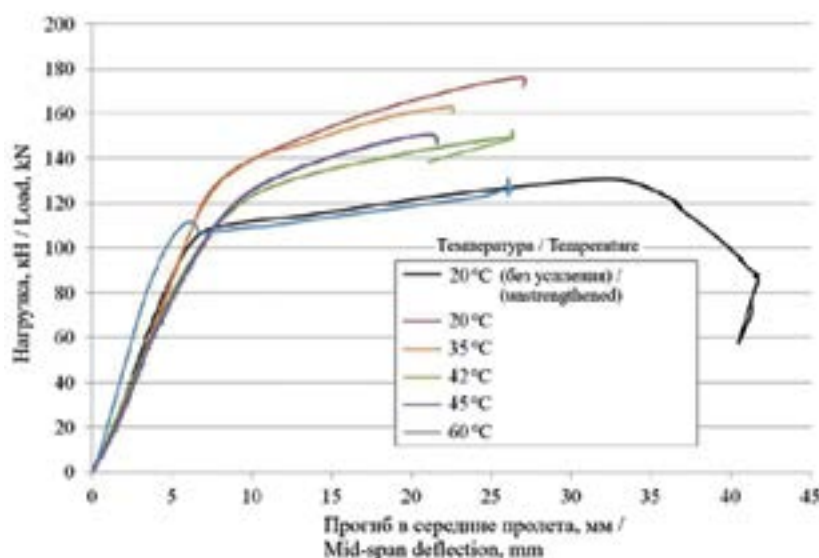


Рис. 13. Кривая «нагрузка — прогиб» образцов испытания на изгиб при повышенной температуре

Fig. 13. “Load — deflection” curve of bend test specimens at elevated temperature

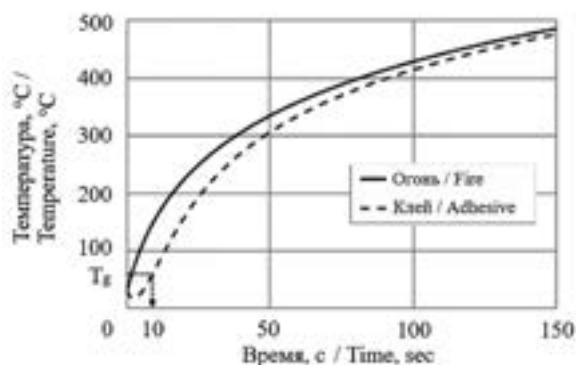


Рис. 14. Влияние экстремальной температуры на неизолированную систему внешнего усиления композитными материалами

Fig. 14. The effect of extreme temperature on non-insulated external reinforcement system with composite materials

была практически незначительной. Температура стеклования адгезивного клеевого материала системы усиления, равная в данном эксперименте 50 °С, была достигнута в течение 10 с.

Из этого следует, что степень огнестойкости композитных углепластиковых материалов является недостаточной для применения в качестве систем внешнего усиления металлических конструкций. Использование изолирующих защитных противопожарных систем служит обязательным требованием при проектировании в гражданском и промышленном строительстве для поддержания требуемого уровня пожарной безопасности.

Были проведены теоретические и численные термические анализы для изолирующих противопожарных систем из материалов с различной теплопроводностью и толщиной слоя, графически изображенные на рис. 15 и 16.

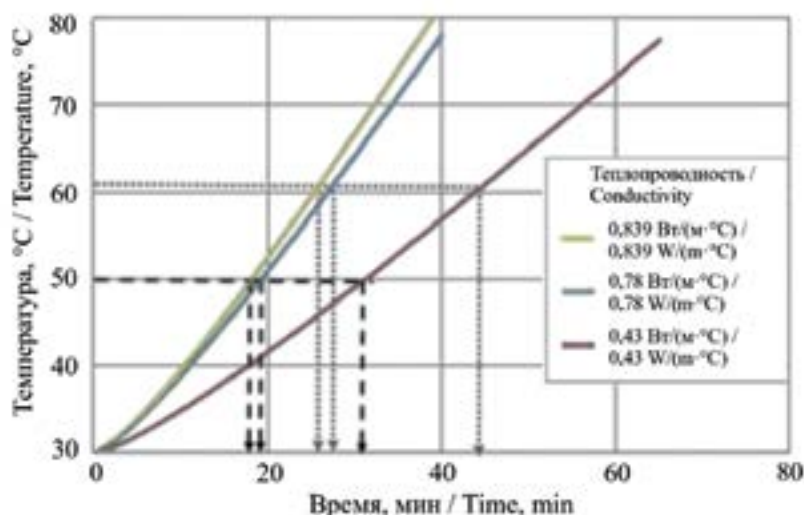


Рис. 15. Температура системы внешнего усиления композитными материалами с изоляцией различной теплопроводности

Fig. 15. Temperature of the external strengthening system with composite materials with insulation of various thermal conductivity

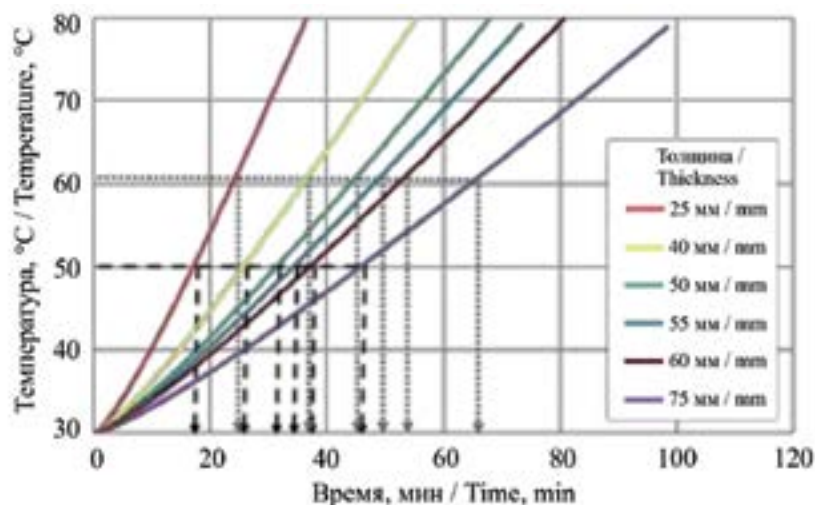


Рис. 16. Температура системы внешнего усиления композитными материалами с изоляцией различной толщиной слоя

Fig. 16. Temperature of the external strengthening system with composite materials with insulation of various layer thicknesses

Данные графических зависимостей показали, что при снижении теплопроводности изолирующего материала на 51 % огнестойкость может быть увеличена на 65 %. При увеличении толщины слоя изоляции на 300 % увеличение огнестойкости составило всего 240 %. Из этого следует, что наиболее рационально использовать изолирующие материалы с меньшей теплопроводностью и варьировать их толщиной слоя для достижения необходимого показателя огнестойкости систем внешнего усиления композитными углепластиковыми материалами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенного теоретического анализа исследований по усилению металлических конструкций композитными углепластиковыми материалами в условиях действия внешней агрессивной среды можно сделать следующие выводы:

- в ряде рассмотренных экспериментальных испытаний прочность на растяжение стальных образцов, усиленных углепластиковыми материалами, увеличилась на 59 % по сравнению с прочностью образцов без усиления. Прочность на растяжение при изгибе усиленных образцов увеличилась на 35 %. Следовательно, экспериментальные исследования подтвердили эффективность усиления металлических конструкций с помощью композитных углепластиковых материалов;
- по данным экспериментального исследования клеевого соединения стальных элементов и углепластиковых материалов выявлена зависимость прироста прочности усиленных образцов от длины клеевого соединения. Так, при увеличении длины клеевого соединения на 82 % прочность образцов на растяжение увеличивается в среднем на 71 %. Значительный интерес представляет разработка методики расчета прочности металлических конструкций, усиленных композитными материалами, с учетом понижающего коэффициента, учитывающего отличие от эталонного значения длины клеевого шва;
- прекращение совместной работы усиливаемых элементов металлических конструкций и систем усиления в проводимых экспериментальных испытаниях происходило вследствие разрушения

клеявого соединения при уровне напряжений в ладелях, равных 28–32 % от прочности углеродного композита. Необходимо увеличение прочности клеевого шва и, как результат, использование полной прочности углепластиковых материалов. Особое внимание следует уделить исследованию возможности дополнительного закрепления композитных материалов с усиливаемыми металлическими конструкциями с использованием заклепочных соединений, повышающих прочность на сдвиг.

- применение композитных углепластиковых материалов для восстановления и усиления металлических конструкций, подверженных усталостным разрушениям, позволяет увеличить сопротивление усталости и уменьшить скорость роста усталостных трещин. В рассмотренных экспериментальных испытаниях сопротивление усталости было увеличено в три раза, что подтверждает эффективность применения систем усиления стальных конструкций при усталостных напряжениях;
- для предотвращения возникновения гальванической коррозии в месте контакта углепластиковых материалов и металлических конструкций рекомендуется использовать эпоксидные защитные покрытия или клеевые составы с высокими изоляционными свойствами, позволяющие уменьшить скорость коррозии до 23 раз;
- при достижении температуры стеклования углепластиковых материалов прирост несущей способности от систем внешнего усиления уменьшается на 50 %, а при повышении температуры до 60 °С — системы внешнего усиления неэффективны и не повышают несущую способность. Рекомендуется использовать композитные материалы и клеевые адгезивные составы с температурой стеклования выше, чем максимальная рабочая температура окружающей среды;
- применение внешнего усиления из композитных углепластиковых материалов ограничено их низким показателем огнестойкости. Для достижения показателя огнестойкости, равного не менее одного часа, необходимо использовать системы внешней противопожарной изоляции из материалов теплопроводностью 0,043 Вт/(м·°С) и толщиной слоя 75 мм или с эквивалентными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грешкина Е.В., Сорокина Е.Н., Софьяников О.Д. Влияние температуры на физико-механические свойства неметаллической арматуры // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 2 (92). С. 12–15.
2. Леонова А.Н., Софьяников О.Д., Кривенкова Т.В. Особенности усиления строительных конструкций композитными полимерными материалами в условиях высоких и низких температур // Перспективы науки. 2019. № 5 (116). С. 64–69.

3. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. Состояние проблемы // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 3. С. 1–27. Идентификационный номер статьи в журнале 19TVN314. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf>
4. Щербо А.Г., Лазовский А.Д. Усиление изгибаемых стальных и сталебетонных строительных конструкций композиционными материалами // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2008. № 12. С. 70–80.
5. Pellegrino C., Maiorana E., Modena C. FRP strengthening of steel and steel-concrete composite structures: an analytical approach // Materials and Structures. 2009. No. 42. Issue 3. Pp. 353–363. DOI: 10.1617/s11527-008-9386-6
6. Капустина Е.П. Применение композиционных полимерных материалов при усилении металлических конструкций, работающих на изгиб // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. № 6 (128). С. 53–57.
7. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования клеевого соединения элементов из стали и углепластиковых композиционных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 69–73.
8. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования стальных элементов, усиленных углепластиковыми композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 9. С. 25–29.
9. Selvaraj S., Madhavan M. Design of Steel Beams Strengthened with Low-Modulus CFRP Laminates // Journal of Composites for Construction. 2020. Vol. 24. Issue 1. P. 04019052. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000983
10. Jiao H., Mashiri F., Zhao X.-L. A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets // Thin-Walled Structures. 2012. Vol. 59. Pp. 144–152. DOI: 10.1016/j.tws.2012.06.002
11. Карпанина Е.Н., Софьяников О.Д. Разработка базовой методики определения поверхностного коррозионного износа стальных конструкций // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 11 (89). С. 108–111.
12. Леонова А.Н., Чернова А.А. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами // Наука и современность. 2017. С. 126–132.
13. Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments // Journal of Composites for Construction. 2001. No. 5 (3). Pp. 200–210. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:3(200)
14. Dawood M., Rizkalla S., Sumner E. Fatigue and overloading behavior of steel-concrete composite flexural members strengthened with high modulus CFRP materials // Journal of Composites for Construction. 2007. Vol. 11. Issue 6. Pp. 659–669. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:6(659)
15. Zhao X.-L., Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures // Engineering Structures. 2007. Vol. 29. Issue 8. Pp. 1808–1823. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.10.006
16. Al-Saidy A.H., Klaiber F.W., Wipf T.J. Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates // Journal of Composites for Construction. 2004. Vol. 8. Issue 2. Pp. 163–172. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:2(163)
17. Liu X., Silva P., Nanni T. Rehabilitation of steel bridge members with FRP composite material // Proc. Composite in Construction, Porto, Portugal, 10–12 October. 2001.
18. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Татиев Д.А., Чесноков Г.В., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 3 (22). С. 1–23. Идентификационный номер статьи в журнале 20TVN314. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf>
19. Abed G. Effects of temperature on the adhesive bonding in steel beams reinforced with CFRP composites // University of Southampton. 2012.
20. Chandrathilaka E.R.K., Gamage J.C.P.H. Fire performance of CFRP strengthened steel I beams cured at elevated temperature // The 9th International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka, December 13–15. 2018.

Поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Николаевна Леонова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций Института строительства и транспортной инфраструктуры (ИСТИ); Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 367107; lan75@mail.ru;

Олег Дмитриевич Софьяников — инженер кафедры строительных конструкций, магистрант кафедры строительных конструкций Института строительства и транспортной инфраструктуры (ИСТИ); **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 996777; oleg.sofianikov@gmail.com;

Ирина Андреевна Скрипкина — магистрант кафедры строительных конструкций Института строительства и транспортной инфраструктуры (ИСТИ); **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 1052902; skripkina.isia@mail.ru.

REFERENCES

1. Greshkina E.V., Sorokina E.N., Sofyanikov O.D. Effect of temperature on physical and mechanical properties of non-metallic reinforcement. *Science and Business: Development Ways*. 2019; 2(92):12-15. (rus.).
2. Leonova A.N., Sofyanikov O.D., Krivenkova T.V. Features of Strengthening Building Structures with Composite Polymeric Materials in Conditions of High and Low Temperatures. *Science Prospects*. 2019; 5(116):64-69. (rus.).
3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 1. State of the problem. *Internet journal "Science of Science"*. 2014; 3:1-27. Journal Article Identification Number 19TVN314. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf> (rus.).
4. Shcherbo A.G., Lazovskij A.D. Strengthening bending steel and steel-concrete building structures with composite materials. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2008; 12:70-80. (rus.).
5. Pellegrino C., Maiorana E., Modena C. FRP strengthening of steel and steel-concrete composite structures: an analytical approach. *Materials and Structures*. 2009; 42(3):353-363. DOI: 10.1617/s11527-008-9386-6
6. Kapustina E.P. Application of composite polymeric materials instrengthening of metal structures working on bending. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2017; 6(128): 53-57. (rus.).
7. Tusnin A.R., Shchurov E.O. Experimental Investigation of a Glue Compound of Elements from Steel and Carbon Composite Material. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 7:69-73. (rus.).
8. Tusnin A.R., Shchurov E.O. Experimental Studies of Steel Elements Strengthened by Carbon Fiber Composite Materials. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 9:25-29. (rus.).
9. Selvaraj S., Madhavan M. Design of Steel Beams Strengthened with Low-Modulus CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*. 2020; 24(1):04019052. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000983
10. Jiao H., Mashiri F., Zhao X.-L. A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets. *Thin-Walled Structures*. 2012; 59:144-152. DOI: 10.1016/j.tws.2012.06.002
11. Karpanina E.N., Sofyanikov O.D. Development of the Basic Method of Determining the Surface Corrosion of Steel Structures. *Science and business: development ways*. 2018; 11(89):108-111. (rus.).
12. Leonova A.N., Chernova A.A. Features of reinforcing metal structures with composite materials. *Science and Modernity*. 2017; 126-132. (rus.).
13. Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments. *Journal of Composites for Construction*. 2001; 5(3):200-210. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:3(200)
14. Dawood M., Rizkalla S., Sumner E. Fatigue and overloading behavior of steel-concrete composite flexural members strengthened with high modulus CFRP materials. *Journal of Composites for Construction*. 2007; 11(6):659-669. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:6(659)
15. Zhao X.-L., Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. *Engineering Structures*. 2007; 29(8):1808-1823. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.10.006
16. Al-Saidy A.H., Klaiber F.W., Wipf T.J. Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates. *Journal of Composites for Construction*. 2004; 8(2):163-172. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:2(163)
17. Liu X., Silva P., Nanni A. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. *Proc. Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October*. 2001.
18. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Tatiev D.A., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V. Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 2. Using the method of limit states to calculate bending and rupture structures. *Internet journal "Science of Science"*. 2014; 3(22):1-23. Journal Article Identification Number 20TVN314. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf> (rus.).

19. Abed G. Effects of Temperature on the Adhesive Bonding in Steel Beams Reinforced with CFRP Composites. *University of Southampton*. 2012.

20. Chandrathilaka E.R.K., Gamage J.C.P.H. Fire performance of CFRP strengthened steel I beams cured

at elevated temperature. *The 9th International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka, December 13-15*. 2018.

Received December 25, 2019.

Adopted in a revised form on March 6, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

B I O N O T E S: **Anna N. Leonova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures of Institute of construction and transport infrastructure (ICTI); **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RISC: 367107; lan75@mail.ru;

Oleg D. Sofyanikov — engineer of the Department of Building Structures, undergraduate of the Department of Building Structures of Institute of construction and transport infrastructure (ICTI); **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RISC:996777; oleg.sofyanikov@gmail.com;

Irina A. Skripkina — undergraduate of the Department of Building Structures of Institute of construction and transport infrastructure (ICTI); **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RISC:1052902; skripkina.isia@mail.ru.

Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels

Karina Buka-Vaivade¹, Mikhail N. Kirsanov², Dmitrijs O. Serdjuks¹

¹ Riga Technical University (RTU); Riga, Latvia;

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. By method of induction using three independent parameters (numbers of panels) formulas for deflection under different types of loading are derived. Curves based on the derived formulas are analyzed, and the asymptotic of solutions for the number of panels are sought. The frame is statically definable, symmetrical, with descending braces. The problem of deflection under the action of a load evenly distributed over the nodes of the upper chord, a concentrated load in the middle of the span, and the problem of shifting the mobile support is considered.

Materials and methods. The calculation of forces in the truss bars is performed in symbolic form using the method of cutting nodes and operators of the Maple computer mathematics system. The deflection is determined by the Maxwell – Mohr formula. Operators of the Maple computer mathematics system are used for composing and solving homogeneous linear recurrent equations that satisfy sequences of coefficients of the required dependencies. The stiffness of all truss bars is assumed to be the same.

Results. All the obtained dependencies have a polynomial form for the number of panels. To illustrate the obtained solutions and their qualitative analysis, curves of the deflection dependence on the number of panels are constructed.

Conclusions. A scheme of a statically definable three-parameter truss is proposed that allows an analytical solution of the problem of deflection and displacement of the support. The obtained dependences can be used in engineering practice in problems of structural rigidity optimization and for evaluating the accuracy of numerical solutions.

KEYWORDS: planar truss, frame, deflection, induction, Maple, analytical solution, console

FOR CITATION: Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuks D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

Расчет деформаций модели плоской фермы консольно-рамного типа с произвольным числом панелей

К. Бука-Вайваде¹, М.Н. Кирсанов², Д.О. Сердюк¹

¹ Рижский технический университет (РТУ); г. Рига, Латвия;

² Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
(НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Методом индукции по трем независимым параметрам (числам панелей), характеризующим пропорции конструкции и ее частей, дается вывод формул для прогиба при различных типах нагружения. Анализируются кривые, построенные по выведенным формулам, разыскивается асимптотика решений по числу панелей. Рама — статически определимая, симметричная, с нисходящими раскосами в простой решетке ригеля и консолей. Конструкция имеет подвижную и неподвижную опоры. Рассмотрены: задача о прогибе под действием нагрузки, равномерно распределенной по узлам верхнего пояса, сосредоточенной нагрузки в середине пролета и задача о смещении подвижной опоры.

Материалы и методы. Расчет усилий в стержнях фермы произведен в символьной форме с использованием метода вырезания узлов и операторов системы компьютерной математики Maple. Прогиб определен по формуле Максвелла – Мора с учетом только сжимающих и растягивающих усилий в стержнях. По результатам последовательности аналитических расчетов ферм с различным числом панелей в ригеле, консолях и опорных фермах методом индукции выведены итоговые расчетные формулы для прогиба и смещения опоры. Операторы специального пакета genfunc системы компьютерной математики Maple использованы для составления и решения однородных линейных рекуррентных уравнений, которым удовлетворяют последовательности коэффициентов искомых зависимостей. Жесткость всех стержней фермы принимается одинаковой.

Результаты. Все полученные зависимости имеют полиномиальную по числу панелей форму. Для иллюстрации полученных решений и их качественного анализа построены кривые зависимости прогиба от числа панелей.

Выводы. Предложена схема статически определимой трехпараметрической фермы, допускающая аналитическое решение задачи о прогибе и смещении опоры. Полученные зависимости могут быть использованы в инженерной практике в задачах оптимизации конструкции по жесткости и для оценки точности численных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плоская ферма, рама, прогиб, индукция, Maple, аналитическое решение, консоль

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бука-Вайваде К., Кирсанов М.Н., Сердюк Д.О. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 510–517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

INTRODUCTION

Planar trusses, as a rule, are the supporting components of the frames of spatial structures. Ignoring the work of links¹, the calculation of the spatial truss can be replaced by the calculation of individual planar trusses. Deflection calculation, the most difficult part of the design calculation in a practical sense, is usually performed numerically in known numerical packages based on the finite element method, including taking into account the nonlinearity of the problem [1–6] and dynamics. Accurate solutions in the form of simple formulas that depend on all design parameters are always a good help for such calculations. The more parameters are included in analytical solutions, the more valuable such formulas are. For example, the Kachurin's formula is widely known [7]. Formulas for some planar trusses with an arbitrary number of panels were obtained by V.A. Ignatiev [8]. The most effective method was an inductive method for obtaining formulas for deflection taking into account the number of panels. The monograph [9] provides more than 70 exact solutions to the problem of deformation of various statically definable flat trusses of beam, arch, and frame types obtained by induction using one or two integer parameters that characterize the number of panels in the structure. In [9] did not include (or did not include completely) the works [10–16], which also use the induction method for obtaining solutions in symbolic form. In [17, 18], the double induction method is used to derive the deflection formula. An overview of some works on this topic can be found in [19].

The main aim of this paper is to derive a formula for the deflection of a frame-type truss with three independent parameters that characterize the number of panels. A cantilever frame scheme is proposed (Fig. 1). A truss is a regular one to which the inductive method is applicable. For the first time, the problem of finding (“hunting”) statically definable regular trusses was raised by R.G. Hutchinson and N.A. Fleck [20, 21].

¹ Kirsanov N.M. Connections in the metal frame of an industrial building. Voronezh, VISI, 1990; 26. URL: <http://vuz.exponenta.ru/PDF/book/SV/sv.html> (rus.).

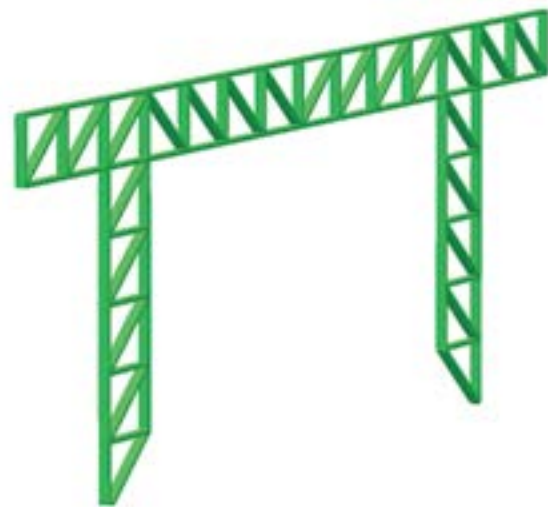


Fig. 1. Frame, $m = 5$, $n = 4$, $k = 2$

General problems of periodic bar structures are described in [22]. Analytical solutions can be used to solve structural optimization problems [23–29].

In this paper, we consider a truss consisting of a crossbar with $2n$ panels, two consoles with k panels in each, and support trusses with m panels in height. Together with three rigid bars that model supports, the truss contains $n_s = 8(n + m + k) + 5$ bars.

MATERIALS AND METHODS

Calculating the vertical offset of node C (Fig. 2) performed using the Maxwell–Mohr's formula

$$\Delta = P \sum_{j=1}^{n_s-3} \frac{S_j s_j l_j}{EF}, \quad (1)$$

where l_j and S_j is the length and force in the j -th bar from the action of the load, s_j — is the force from the unit force applied to the Central node C in the direction of the desired movement, E is the elastic modulus of the bars, F is the cross-sectional area.

Summation is performed on all the frame bars, except for the three support ones, which are accepted

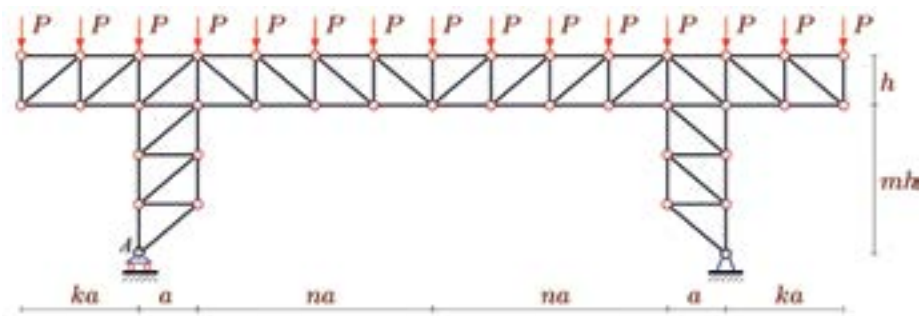


Fig. 2. The scheme of the truss, the load on the top chord, $m = 3$, $n = 4$, $k = 2$

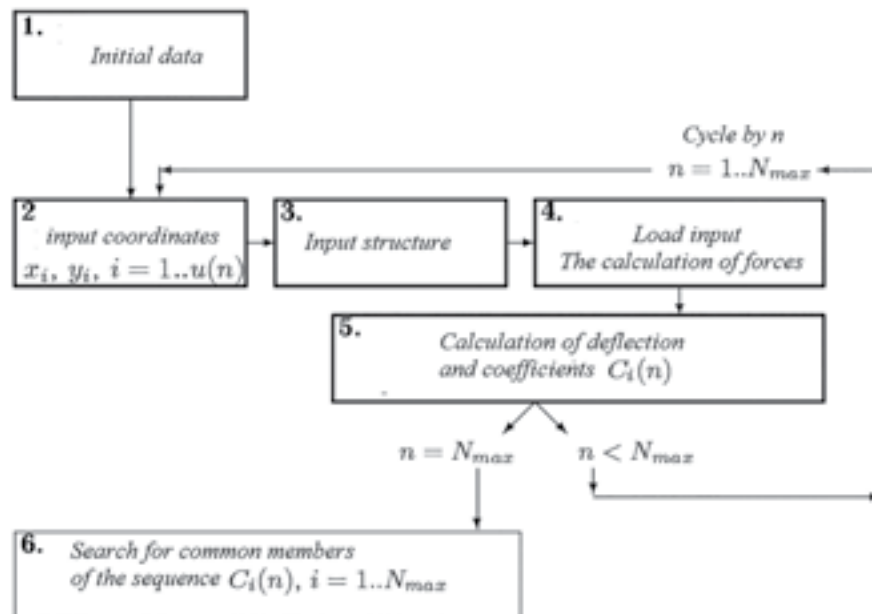


Fig. 3. The block diagram of the program

as non-deformable. The solution is searched for in an analytical form, so the efforts in the bars included in (1) must also be searched for in the form of formulas. The truss is statically definable, so it is most convenient to find it from the General system of equilibrium equations for all nodes (internal hinges). The coefficients in this system are the guiding cosines of the forces. The calculation is performed using the program [17, 18], written in the Maple language (Fig. 3).

At the beginning (block 1), the program enters the estimated number of cycles N_{max} , which is sufficient for the program to allocate common terms of the sequence of coefficients of the desired formula for deflection. The dimensions of the structure and the load value are not set, these values are undefined parameters of the problem. In block 2, the coordinates of the hinges are set. Entering coordinates for arbitrary parameters m , n , k is performed in cycles. In this problem, the hinges are numbered first along the inner and then along the outer contour of the truss (Fig. 4). Here is a fragment of the program with a set of coordinates, for example, the hinges of the left truss-rack:

```
> x[1]:=k*a;y[1]:=0;
> for i to m do x[i+1]:=k*a+a; y[i+1]:=h*i; end;
```

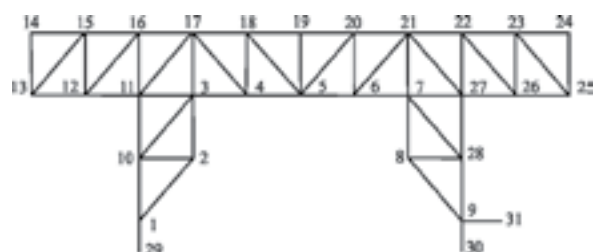


Fig. 4. The scheme of truss, $m = n = k = 2$

The structure of the connection of nodes (hinges) and bars in block 3 is set by special vectors containing the numbers of the ends of the bars. Vectors for entering bars along the internal and external contour of the truss have the form:

```
> m1:=m+n;
> for i to 2*m1 do
    N[i]:=[i, i+1]; end;
> for i to 2*m1+4*k+2 do
    N[i+2*m1]:=[i+2*m1+1, i+2*m1+2]; end;
```

Here \mathbf{N} is a conditional vector with the number of the corresponding bar and coordinates equal to the numbers of nodes at its ends. The effort values do not depend on the choice of the directions of these vectors. In block 4, the vector \mathbf{B} of the right part of the system of equilibrium equations $\mathbf{GS} = \mathbf{B}$ is created, where \mathbf{G} is the matrix of the system's coefficients, and \mathbf{S} is the vector of forces in all the truss bars, including the three reference ones. A uniform load on the upper chord nodes is introduced into the even elements of the vector:

```
> for i from 2*m1+m+k+2 to 3*m1+3*k+n+4
do B[2*i]:=1: end:
```

The matrix \mathbf{G} of the node equilibrium equations is formed from the guiding cosines of the forces determined based on the specified geometry of the structure and the order of connecting bars. Odd rows of the matrix correspond to the projection of forces on the x axis, even-projections on the y axis, in the same block, the system of equations is solved. The inverse matrix method is used. In the Maple system, this is surprisingly simple. Maple works with matrices as with numbers:

$\mathbf{G1}:=1/\mathbf{G}; \mathbf{S}:=\mathbf{G1}.\mathbf{B}$

Here $\mathbf{G1}$ is the inverse matrix. The matrix is multiplied by a column using the dot symbol.

In block 5, using the Maxwell-Mohr's formula (1), an expression for deflection is found. It turns out that the type of solution does not change for trusses with different numbers n and m (a consequence of the regularity property of the construction):

$$\Delta = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3) / (h^2 EF), \quad (2)$$

where $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ is the length of the brace. Elements of coefficient sequences are highlighted by the **coeff** operator.

Block 6, which searches for common sequence members, is executed after the completion of a cycle of n deflection calculations. There is one problem here. If the cycle is not long enough, then the operator for detecting the recurrent equation for sequence elements does not give a plausible answer. In this case, you should increase N_{\max} and continue the cycle. According to the operation condition of the **rgf_findrecur** operator for composing recurrent equations, the length of the sequence under study must be even. Block 6 gives an answer for solving the problem with random n , but fixed values of m and k . To get a formula that is valid for any n, m, k , you need to create two more external cycles for m and k , thus performing a triple induction. The need for triple induction is the main problem for this truss, due to the fact that the maple system performs character transformations very slowly, especially for large-size matrices.

RESULTS

In the first of three cycles, the cycle for the number of panels n , the program outputs a sequence of coefficients before the cubes a^3, c^3 and h^3 . For example, for a coefficient C_1 with $m = k = 1$, we have numbers: 3, 51/2, 92, 475/2, 507, 1911/2, The **rgf_findrecur** operator gives the following equation

$$C_{1,n} = 5C_{1,n-1} - 10C_{1,n-2} + 10C_{1,n-3} - 5C_{1,n-4} + C_{1,n-5}.$$

Its solution has the form

$$C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 6) / 12.$$

The calculation for $m = 2, 3, 4$ in the second cycle shows that this coefficient does not change. In the k loop we get

$$k = 2: C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 30) / 12,$$

$$k = 3: C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 66) / 12,$$

$$k = 4: C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 114) / 12,$$

$$k = 5: C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 174) / 12,$$

...

Generalization by k only concerns the last term in these expressions. As a result, for random n, m, k we get

$$C_1 = (n+1)^2(5n^2 + 10n - 6k^2 - 6k + 6) / 12. \quad (3)$$

Similarly, for two other coefficients in (2) we get

$$\begin{aligned} C_2 &= (n+1)^2 / 2, \\ C_3 &= (n^2 + 2mn + 3m + 2km - 1) / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

The proposed formula output algorithm can be easily adapted to other loads. In the case of a load applied to the middle of the span to the node of the lower chord, the right part of the system of equations has the form

$$\mathbf{i} := \mathbf{m} + \mathbf{n} + \mathbf{1}; \mathbf{B}[2*\mathbf{i}] := \mathbf{1}$$

Obviously, the consoles remain unloaded, and the number of panels k does not affect the deflection in any way. Induction over n and m gives the following expressions for coefficients in (2):

$$\begin{aligned} C_1 &= (n+1)(2n^2 + 4n + 3) / 6, \\ C_2 &= (n+1) / 2, \\ C_3 &= (n+m-1) / 2. \end{aligned} \quad (5)$$

The left support of the structure is movable and under the action of a vertical load it is displaced. The offset value is calculated in the same program:

$$\begin{aligned} \delta_A &= P(A_1 a^3 + A_2 c^3 + A_3 h^3) / (h a E F), \\ A_1 &= (4(1+2m)n^3 + 3(3+8m)n^2 + \\ &\quad + (5-6k^2-6k-12mk^2-12mk+22m)n - \\ &\quad - 6m(k^2+k-1)) / 6, \\ A_2 &= m(2n+1), \\ A_3 &= m(m+1)(2k+2n+3) / 2. \end{aligned} \quad (6)$$

Verification of the derived formulas can be performed either in numerical mode, or simply by changing the order of the parameters m , n , k in the induction process.

The obtained dependencies have a relatively simple form and are easily analyzed. Consider, for example, the case when the total number of panels in the crossbar and consoles is constant. Let $n + k = 20$. We also fix the span length $L = 2na = 100$ m and the total load evenly distributed across the nodes of the upper chord $P_{sum} = P(2n + 2k + 2)$. The dependence of the dimensionless deflection $\Delta' = \Delta EF / (P_{sum} L)$ on the number of panels n (Fig. 5) shows that for small n and, consequently, large k (long consoles), the deflection

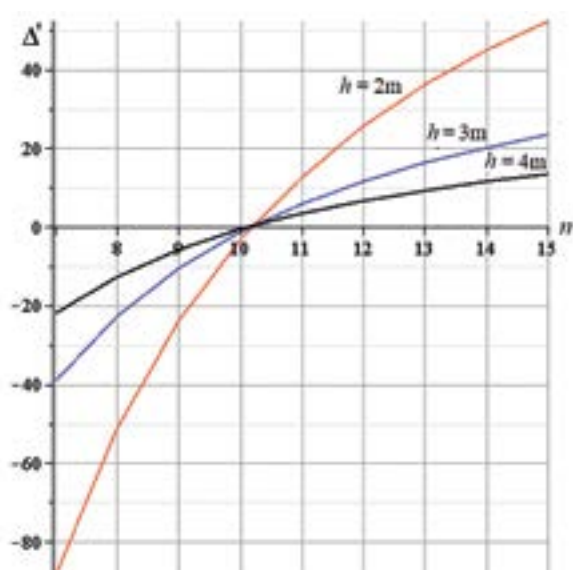


Fig. 5. Dependence of the deflection on the number of panels, $m = 3$, $L = 2na = 100$ m

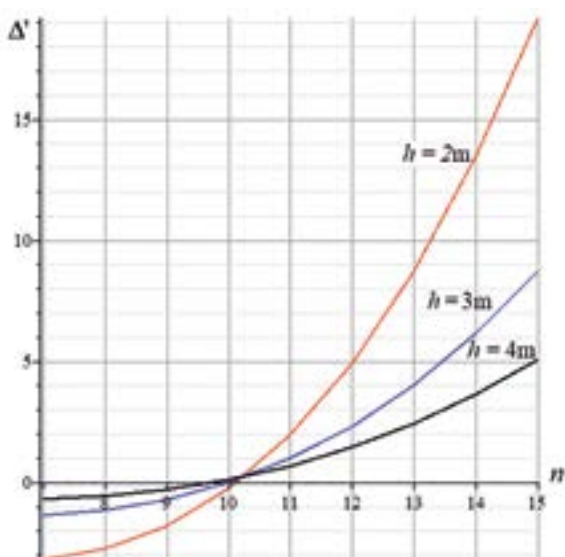


Fig. 6. Dependence of the deflection on the number of panels, $m = 3$, $L = 2a(n + k + 1) = 100$ m

is negative — the middle of the span is raised by the forces applied to the consoles. If the number n increases (the consoles are shortened), the crossbar in the middle naturally bends down. Almost the same effect is obtained, if you do not fix the span (the distance between the support of trusses), but the total length of the structure $L = 2a(n + k + 1) = 100$ m. The curves also have a common intersection point for different heights, but their convexity is directed downward (Fig. 6).

The analytical form of the solution using Maple methods allows us to find some of its asymptotics. For independent values of n and m , we have the following asymptotes of the solution (3, 4): $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta' / n = h / (2L)$,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' / k = -L^2 (n+1)^2 / (32n^3 h^2).$$

Note that if in the first case the slope of the asymptote increases with decreasing span length $L = 2na$, then in the second case (unlimited increase in console lengths) this dependence is reversed. The solution (6) of the problem of shifting the left movable support under the action of a vertical uniform load applied to the upper chord has similar asymptotes:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta' / n = h^2 m(m+3) / L^2,$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \delta' / k = -L(n+m) / (8n^2 h).$$

Here $\delta' = \delta EF / (P_{sum} L)$ is a dimensionless offset. When $\delta' > 0$, the support A (Fig. 2) is shifted to the left. The asymptotics of solving problem (6) for the number of panels m at a fixed height $H = mh$ is nonlinear:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \delta' / m^2 = \frac{L(2n+1)(2n^2+5n+6-3k^2-3k)}{24n^2(n+k+1)H}.$$

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The considered frame-type truss has a simple lattice for which it is easy to obtain internal forces values using standard methods, such as the cross-section method. The Ritter's cross section is available for almost all bars in the structure, except for only three bars above the truss supports. In spite of this, the method of cutting out nodes with the compilation of the matrix of the equilibrium equation of all nodes is used to get formulas for the deflection and displacement of the support. This is justified, firstly, by the fact that the reactions of the supports are determined simultaneously with the internal forces, and secondly, by using a computer program with free independent parameters (the number of panels), the result for the internal forces and, consequently, for the deflection is obtained automatically. This allows to get a series of solutions for which the desired formulas are derived by induction. For the solutions found, some asymptotics

characteristics are revealed that give estimates of deflection or displacement with an extreme increase in the number of panels. As an illustration of the application of solutions, the paper presents a solution to the problem of the ratio of the number of panels in the crossbar and consoles. The characteristic point of intersection of curves corresponding to zero or very small deflection

is found. Analytical solutions obtained by the induction method are convenient both for other, more complex problems of optimizing structures and for evaluating numerical solutions, especially since the accuracy of the analytical solution does not depend on the number of panels. For large-span structures, where the number of panels is very large, this is especially important.

REFERENCES

1. Rybakov V.A., Gamayunova O.S. The stress-strain state of frame constructions' elements from thin-walled cores. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013; 7(12):79-123. (rus.).
2. Rybakov V.A., Al Ali M., Panteleev A.P., Fedotova K.A., Smirnov A.V. Bearing capacity of rafter systems made of steel thin-walled structures in attic roofs. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 76(8): 28-39. DOI: 10.18720/MCE.76.3
3. Mathieson C., Roy K., Clifton G., Ahmadi A., Lim J.B.P. Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with HRC connectors. *Engineering Structures*. 2019; 201:109741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109741
4. Villegas L., Moran R., Garcia J.J. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses. *Engineering Structures*. 2019; 184:495-504. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.114
5. Dong L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020; 173:105460. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105460
6. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and fem-modelling. *Advanced Materials Research*. 2014; 945-949:1211-1215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.1211
7. Marutyan A.S., Grigoryan M.B. Minimum height of steel trusses and their cross systems, including modules of coverings and overlappings of the Pyatigorsk type. *Modern science and innovations*. 2013. 1(1):52-62. (rus.).
8. Galishnikova V.V., Ignatiev V.A. *Regular rod systems. Theory and methods of calculation*. Volgograd, VolgGASU Publ., 2006; 551. (rus.).
9. Kirsanov M.N. *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. Cambridge Scholars Publishing. Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK, 2019; 206.
10. Egorov S.S. The inductive method of solving the problem of deflection of the symmetric core structures of complex shape in the system Maple for arbitrary number of panels. *Science Almanac*. 2017; 3-3(29):254-257. URL: <http://ucom.ru/doc/na.2017.03.03.254.pdf> DOI: 10.17117/na.2017.03.03.254
11. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The formula for the deflection of a truss loaded at half-span by a uniform load. *Postulat*. 2018; 3:2.
12. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Two-parameter derivation of the formula for deflection of the console truss. *Postulat*. 2018; 5:22.
13. Kitaev S.S. Derivation of the formula for the deflection of a cantilevered truss with a rectangular diagonal grid in the computer mathematics system Maple. *Postulat*. 2018; 5:43.
14. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Analytical calculation and analysis of planar springel truss. *Structural mechanics and structures*. 2018; 2(17):72-79.
15. Arutyunyan V.B. Calculation of the deflection of a statically indeterminate beam truss. *Postulat*. 2018; 6:42.
16. Arutyunyan V.B. Calculation of the deflection of a decorative lattice of a truss with an arbitrary number of panels under the load in the middle of the span. *Postulat*. 2017; 7:3.
17. Arutyunyan V.B. Double induction for deriving a formula for deflecting a frame truss with an arbitrary number of panels. *Postulat*. 2018; 7:5.
18. Kirsanov M.N., Buka-Vaivade K. Analytical calculation of the deflection of the rod frame with an arbitrary number of panels. *Structural mechanics and structures*. 2019; 3(22):21-28.
19. Tinkov D.V. Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 5:66-73. DOI: 10.5862/MCE.57.6 (rus.).
20. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
21. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
22. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016; 96:184-203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007
23. Degertekin S.O., Lamberti L., Ugur I.B. Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied*

Soft Computing. 2018; 70:903-928. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.10.001

24. Tinkov D.V., Safonov A.A. Design optimization of truss bridge structures of composite materials. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017; 46(1):46-52. DOI: 10.3103/S1052618817010149

25. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimization of flat steel frame and foundation posts system. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 61(1):14-24. DOI: 10.5862/MCE.61.2 (rus.).

26. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimization of frame structures with possibility of emergency actions. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 9:23-29. DOI: 10.5862/MCE.44.3 (rus.).

27. Kaveh A., Laknejadi K. A hybrid evolutionary graph-based multi-objective algorithm for layout optimization of truss structures. *Acta Mechanica*. 2013; 224(2):343-364. DOI: 10.1007/s00707-012-0754-5

28. Degertekin S.O., Lamberti L., Ugur I.B. Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*. 2019; 79:363-390. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.03.058

29. Nie R., He B., Yan S., Ma X. Optimization design method for mesh reflector antennas considering the truss deformation and thermal effects. *Engineering Structures*. 2020; 208:110253. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110253

Received February 10, 2020.

Adopted in a revised form on March 6, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

BIONOTES: **Karina Buka-Vaivade** — Master of Science in Engineering, researcher at the Institute of Structural Engineering and Reconstruction; **Riga Technical University (RTU)**; 6B/6A Kipsalas st., Riga, LV-1048, Latvia; Scopus: 57193744331, ResearcherID: AAD-5973-2020, ORCID: 0000-0001-7296-8158; karina.buka-vaivade@rtu.lv;

Mikhail N. Kirsanov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of robotics, mechatronics, dynamics and strength of machines; **National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RISC: 118571, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, IstinaresearcherID: 2939132; c216@ya.ru;

Dmitrijs O. Serdjuks — D.Sc.Eng., Professor, Professor of the Department of Structural Engineering; **Riga Technical University (RTU)**; 6B/6A Kipsalas st., Riga, LV-1048, Latvia; Scopus: 6508223358, ORCID: 0000-0002-1843-3061; dmitrijs.serdjuks@rtu.lv.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 7 (12). С. 79–123.

2. Rybakov V.A., Al Ali M., Panteleev A.P., Fedotova K.A., Smirnov A.V. Bearing capacity of rafter systems made of steel thin-walled structures in attic roofs // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 76 (8). Pp. 28–39. DOI: 10.18720/MCE.76.3

3. Mathieson C., Roy K., Clifton G., Ahmadi A., Lim J.B.P. Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with HRC connectors // Engineering Structures. 2019. Vol. 201. P. 109741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109741

4. Villegas L., Moran R., Garcia J.J. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses // Engineering Structures. 2019. Vol. 184. Pp. 495–504. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.114

5. Dong L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 173. P. 105460. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105460

6. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and fem-modeling // Advanced Materials Research. 2014. No. 945–949. Pp. 1211–1215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.1211

7. Марутян А.С., Григорьян М.Б. Минимальная высота стальных ферм и их перекрестных систем, включая модули покрытий и перекрытий типа «Пятигорск» // Современная наука и инновации. 2013. № 1 (1). С. 52–62.

8. Галишикова В.В., Игнатъев В.А. Регулярные стержневые системы. Теория и методы расчета. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. 551 с.

9. Kirsanov M.N. Planar trusses: schemes and formulas. Cambridge Scholars Publishing. Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK, 2019. 206 с.

10. Egorov S.S. The inductive method of solving the problem of deflection of the symmetric core structures of complex shape in the system Maple for arbitrary number of panels // Science Almanac. 2017. No. 3–3 (29). Pp. 254–257. URL: http://

ucom.ru/doc/na.2017.03.03.254.pdf DOI: 10.17117/na.2017.03.03.254

11. *Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A.* The formula for the deflection of a truss loaded at half-span by a uniform load // *Postulat*. 2018. No. 3. P. 2.

12. *Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A.* Two-parameter derivation of the formula for deflection of the console truss // *Postulat*. 2018. No. 5. P. 22.

13. *Kitaev S.S.* Derivation of the formula for the deflection of a cantilevered truss with a rectangular diagonal grid in the computer mathematics system Maple // *Postulat*. 2018. No. 5. P. 43.

14. *Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A.* Analytical calculation and analysis of planar springel truss // *Structural mechanics and structures*. 2018. № 2 (17). Pp. 72–79.

15. *Arutyunyan V.B.* Calculation of the deflection of a statically indeterminate beam truss // *Postulat*. 2018. No. 6. P. 42.

16. *Arutyunyan V.B.* Calculation of the deflection of a decorative lattice of a truss with an arbitrary number of panels under the load in the middle of the span // *Postulat*. 2017. No. 7. P. 3.

17. *Arutyunyan V.B.* Double induction for deriving a formula for deflecting a frame truss with an arbitrary number of panels // *Postulat*. 2018. No. 7. P. 5.

18. *Kirsanov M.N., Buka-Vaivade K.* Analytical calculation of the deflection of the rod frame with an arbitrary number of panels // *Structural mechanics and structures*. 2019. Vol. 3. No. 22. Pp. 21–28.

19. *Тиньков Д.В.* Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 5 (57). С. 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6

20. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

21. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Me-*

chanics and Physics of Solids. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

22. *Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R.* Periodic truss structures // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016. Vol. 96. Pp. 184–203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007

23. *Degertekin S.O., Lamberti L., Ugur I.B.* Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm // *Applied Soft Computing*. 2018. Vol. 70. Pp. 903–928. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.10.001

24. *Tinkov D.V., Safonov A.A.* Design optimization of truss bridge structures of composite materials // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46. Issue 1. Pp. 46–52. DOI: 10.3103/S1052618817010149

25. *Серпик И.Н., Алексейцев А.В.* Оптимизация системы стальной плоской рамы и столбчатых фундаментов // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 1 (61). С. 14–24. DOI: 10.5862/MCE.61.2

26. *Серпик И.Н., Алексейцев А.В.* Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 9 (44). С. 23–29. DOI: 10.5862/MCE.44.3

27. *Kaveh A., Laknejadi K.* A hybrid evolutionary graph-based multi-objective algorithm for layout optimization of truss structures // *Acta Mechanica*. 2013. Vol. 224. Issue 2. Pp. 343–364. DOI: 10.1007/s00707-012-0754-5

28. *Degertekin S.O., Lamberti L., Ugur I.B.* Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm // *Applied Soft Computing*. 2019. Vol. 79. Pp. 363–390. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.03.058

29. *Nie R., He B., Yan S., Ma X.* Optimization design method for mesh reflector antennas considering the truss deformation and thermal effects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 208. P. 110253. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110253

Поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Карина Бука-Вайваде** — магистр технических наук, научный сотрудник Института строительства и реконструкции; **Рижский технический университет (РТУ)**; LV-1048, Латвия, г. Рига, ул. Кипсалас 6B/6A; Scopus: 57193744331, ResearcherID: AAD-5973-2020, ORCID: 0000-0001-7296-8158; karina.buka-vaivade@rtu.lv;

Михаил Николаевич Кирсанов — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет (НИУ «МЭИ»)**; 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; РИНЦ ID: 118571, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, IstinaresearcherID: 2939132; c216@ya.ru; c216@ya.ru;

Дмитрий Олегович Сердюк — доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций; **Рижский технический университет (РТУ)**; LV-1048, Латвия, г. Рига, ул. Кипсалас 6B/6A; Scopus: 6508223358, ORCID: 0000-0002-1843-3061; dmitrijs.serdjks@rtu.lv.

Формирование проектных требований на основе управления коррозионной защищенностью стальных конструкций

В.П. Королев, Г.А. Герман

Приазовский государственный технический университет (ПГТУ); г. Мариуполь, Украина

АННОТАЦИЯ

Введение. В мировой практике продвижение стальных конструкций для реализации эффективных проектов строительства зданий и сооружений связано с инновационным внедрением новых материалов и технологий. Этот процесс определяется нормативными требованиями к надежности строительных объектов, которые включают показатели несущей способности, эксплуатационной пригодности и долговечности. Приоритетное направление — предотвращение коррозионного разрушения на основе анализа конструктивной приспособленности и обеспечения качества мер противокоррозионной защиты. Цель исследования — обоснование технико-экономических параметров коррозионной защищенности при проектировании стальных конструкций с учетом требуемого уровня надежности стальных конструкций.

Материалы и методы. На основе принципов проектирования по предельным состояниям проанализированы нормативные требования к средствам и методам защиты от коррозии стальных конструкций. Рассмотрены особенности процессного подхода применительно к подтверждению соответствия показателей коррозионной защищенности стальных конструкций. Установлены условия, позволяющие выполнять статистический контроль и математическое моделирование расчетных критериев несущей способности, эксплуатационной пригодности и долговечности. Определены номенклатура, показатели и методы офлайн и онлайн контроля определяющих параметров коррозионного состояния конструктивных элементов.

Результаты. Действующие нормативные требования, основанные на интервальной оценке показателей коррозионной стойкости и сроке службы защитных покрытий, характеризуют условия проектирования средств защиты как состояние или ситуацию, связанные с коррозионной опасностью. Коррозионная защищенность определяет условия проектирования мер защиты от коррозии по заданным расчетным критериям эксплуатационной пригодности и долговечности. При этом обоснование проектных решений первичной и вторичной защиты выполняется путем расчетного или расчетно-измерительного подтверждения соответствия показателей качества и надежности средств защиты.

Выводы. Расчетные характеристики коррозионной стойкости и долговечности, полученные при офлайн и онлайн контроле определяющих параметров коррозионного состояния конструктивных элементов, обеспечивают инжиниринг качества противокоррозионной защиты. Управление показателями качества и надежности по признакам коррозионной защищенности создает условия для робастного проектирования мер долговременной технико-экономической защиты строительных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальные конструкции, показатели качества, надежность, долговечность, коррозионная стойкость, срок службы защитного покрытия, коррозионная опасность, коррозионная защищенность, процессный подход, подтверждение соответствия

Благодарности. Авторы выражают искреннюю дань памяти профессору Е.И. Беленя, доценту Ю.Л. Вольбергу, профессору А.И. Голубеву за ценные рекомендации и критические замечания, высказанные в 1980–1982 гг. при научном консультировании по проблеме прогнозирования и повышения долговечности стальных конструкций в коррозионных средах.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев В.П., Герман Г.А. Формирование проектных требований на основе управления коррозионной защищенностью стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 518–532. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.518-532

Current issues of improving the pricing system in construction in the transition period

Vladimir P. Korolyov¹, Galina A. German²

Privatovskiy State Technical University; Mariupol, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. In the world practice, promotion of structural steel for execution of new effective projects for building and installation construction is linked with innovative introduction of new materials and technologies. This process is specified by the regulatory requirements for reliability of building facilities including indices of load capacity, serviceability and durability.

At the same time, the priority is to prevent corrosion damages based on the analysis of the design consideration and assurance of quality of corrosion protection measures. However, for today the possibilities of the concept of limit states as the main instrument for eliminating uncertainty of corrosion protectability parameters are not fully unveiled. The aim of the study is to justify the technical and economic parameters of corrosion protectability in the course of structural steel designing taking into account the required level of structural steel reliability.

Materials and methods. The regulatory requirements for means and methods of corrosion protection of structural steel are analyzed on the basis of limit state design principles. Considered are the features of the process approach for affirming compliance of corrosion protectability indices of structural steel. Established are the conditions that allow carrying out the static check and mathematical modeling of design criteria for load capacity, serviceability and durability. Determined are the nomenclature, indices and methods of offline and online monitoring of the constitutive parameters of corrosion state of structural elements.

Results. The regulations in force based on the interval estimation of indices of corrosion resistance and life of protective coatings describe conditions of protective means designing as a state or case linked with corrosion hazard. Corrosion protectability defines conditions for designing the corrosion protection measures based on the specified design criteria for serviceability and durability. At that, design decisions of primary and secondary protection are justified by means of computational or computational-measuring verification of compliance of quality and reliability indices of protection means

Conclusions. Design characteristics of corrosion resistance and durability obtained by offline and online monitoring of the constitutive parameters of corrosion state of structural elements provide engineering of corrosion protection quality. Management of quality and reliability indices based on corrosion protectability signs lays the groundwork for robust designing measures for the long-term technical and economic protection of building facilities

KEYWORDS: structural steel, quality indices, reliability, durability, corrosion resistance, protective coating life, corrosion hazard, corrosion protectability, process approach, compliance affirmation

FOR CITATION: Korolyov V.P., German G.A. Formation of design requirements based on the management of structural steel corrosion protectability. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):518-532. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.518-532 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Расширение функциональных возможностей применения стальных конструкций в строительстве, повышение архитектурной выразительности зданий и сооружений определяют необходимость совершенствования проектных требований к обеспечению качества и надежности на основе критериев предельных состояний. Среди показателей качества стальных конструкций, применяемых в зданиях и сооружениях различного назначения, стандартом ГОСТ 4.253 установлены критерии долговечности: коррозионная стойкость (степень агрессивности среды), мм/год или балл; срок службы защитных покрытий, год. Наряду с непрерывным совершенствованием нормативной базы проектирования стальных конструкций, в отечественных и зарубежных правилах отсутствуют расчетные положения, обосновывающие безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность с учетом технико-экономических аспектов противокоррозионной защиты.

Как известно, нормы, требования и методы контроля показателей качества устанавливаются в зависимости от вида решаемых задач. Период 1950–1970 гг. связан с жесткой регламентацией экономного использования стали и рекомендуемых групп лакокрасочных покрытий для объектов строительства. Систематические исследования в области долговечности начаты на кафедре металлических

конструкций МИСИ им. В.В. Куйбышева (ныне — Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет) под руководством профессора Н.С. Стрелецкого¹, профессора А.И. Кикина² и продолжены в Новосибирском инженерно-строительном институте им. В.В. Куйбышева (ныне — Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет) профессором И.И. Кошиным. Выполнение работ в данном направлении обеспечило приоритетное рассмотрение влияния конструктивных факторов, что позволило оценить устойчивость конструктивных форм против коррозии в требованиях СНиП II-28-73. Стремление к экономии и регламентированию области применения стальных конструкций было закреплено в технических правилах ТП 101-81.

Главным приоритетом периода 1980 годов стал комплексный подход к организации противокоррозионной службы согласно Постановлению Совета Министров от 12.07.1978 № 597. Определен порядок ведения учета потерь от коррозии и затрат на противокоррозионную защиту по форме статистической отчетности № 1-кор, что способствовало объективному анализу экономической эффектив-

¹ Стрелецкий Н.С. Избранные труды / под ред. Е.И. Белея. М. : Стройиздат, 1975. 422 с.

² Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н. и др. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий. 2-е изд. М. : Стройиздат, 1984. 301 с.

ности средств защиты. Благодаря концентрации усилий при решении отраслевой научно-технической проблемы 0.55.16.101 «Разработать и внедрить эффективные методы и средства антикоррозионной защиты строительных конструкций» была выполнена систематизация экспериментальных данных исследований: степени агрессивности воздействий, коррозионной стойкости конструкций и их защитных покрытий, эффективности новых материалов и технологий защиты от коррозии. Методической основой для совершенствования качества стали стандарты ЕСЗКС, устанавливающие единые требования по защите изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) стальных конструкций. Кроме разработки новых норм СНиП 2.03.11-85, вопросы проектирования мер по защите от коррозии получили развитие в Рекомендациях³, а контроль коррозионного состояния нашел отражение в Пособии⁴, подготовленном ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова.

События 1990 годов внесли существенные изменения в постановку организационно-методических задач, решаемых в области строительного проектирования. Нормативное обеспечение эксплуатационной надежности и долговечности зданий и сооружений в постсоветский период усложнилось проблемами структурных изменений в отраслях промышленности, изменением форм собственности основных фондов предприятий. Нерегулируемость вопросов в значительной мере компенсируется большим объемом экспериментальных исследований, позволяющих использовать временную зависимость коррозионного разрушения для прогнозирования долговечности стальных конструкций в условиях строительных объектов различного назначения. Вместе с этим считается, что фактор коррозии не имеет приемлемого аналитического описания. Таким образом, в целях упрощения расчетной модели влияние коррозионных воздействий предлагается не учитывать прямым путем, а запас прочности увеличивать соответствующим значением коэффициента условий работы⁵. Важным приоритетом при построении математических моделей, описывающих процесс взаимодействия элементов конструкции

с агрессивной средой, является оптимизация затрат при проектировании тонкостенных конструкций⁶.

Нестабильный период функционирования и развития экономики, условия формирования рыночных отношений и конкурентной среды потребовали проведения гармонизации нормативных актов с требованиями европейских стандартов (hEN) Еврокодов и принципами всеобщего управления качеством (TQM). Требования адаптации национальных норм к системе европейских и международных стандартов повлияли на развитие системных методов обеспечения долговечности⁷. Стандартом ISO 9001 определена процедура «процессного подхода», которая способствовала переходу на модели управления качеством в процессе всего ЖЦ конструкций. В этой связи качественные и количественные критерии долговечности конструкций и их защитных покрытий приобретают новое содержание благодаря сертификации продукции, услуг и систем качества предприятий⁸. Оценка остаточного ресурса зданий и сооружений направлена на выявление условий исчерпания несущей способности конструкций в результате коррозионного разрушения [1–3].

В зарубежной практике проектирования стальных конструкций управление надежностью при воздействии коррозионных сред достигается путем создания запасов прочности, долговечности стальных конструкций, соответствующего контроля и технического обслуживания строительных объектов [4, 5]. При этом потенциальные причины потери несущей способности и эксплуатационной пригодности определены как изменения геометрических характеристик сечений при сплошной (равномерной или местной) коррозии, а также механических свойств в результате коррозионного растрескивания стали. Принято, что требуемая надежность достигается расчетными методами с допуском на коррозию или путем нанесения защитных покрытий [6, 7]. Проектные спецификации систем лакокрасочных покрытий разрабатывают по требованиям ISO 12944. Однако установленные стандартом ISO 12944-1 интервалы срока службы не являются «гарантированной долговечностью» защитных покрытий, их назначение ориентировано на формирование мер технического обслуживания.

³ Рекомендации по проектированию защиты от коррозии строительных металлических конструкций. М. : ЦНИИ-Проектстальконструкция им. Мельникова, 1988. 166 с.

⁴ Голубев А.И., Горохов Е.В., Королев В.П. и др. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85). М. : Стройиздат, 1989. 51 с.

⁵ Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1995. 352 с.

⁶ Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа: расчет и оптимизация: мон. Днепропетровск : ДДУ, 1995. 190 с.

⁷ Gorochov E.V., Korolev V.P., Balkema A.A. Durability of Steel Structures Under Reconstruction. Rotterdam : Brookfield, 1999. 305 p.

⁸ Долговечность и защита конструкций от коррозии. Строительство, реконструкция (теория, исследования, практика, ресурсосбережение и экология, оценка качества, сертификация): мат. междунар. конф., 25–27 мая 1999 г. М., 1999. 352 с.

В соответствии с данными тенденциями заслуживают особенного внимания работы, направленные на сравнительную оценку экономической эффективности новых материалов и технологий [8, 9] с учетом реальных коррозионных потерь [10]. Программа обеспечения надежности в течение всего ЖЦ должна соответствовать уровню ответственности его конструктивных элементов, обеспечивать контроль технических параметров и мониторинг регламентных требований спецификации проекта [11]. Выбор оптимального варианта технико-экономической защиты предполагает учет статистически значимых критериев долговечности, оценивание которых позволяет снижать инновационные и инвестиционные риски, вызванные возможными отклонениями от расчетных ситуаций [12, 13]. Это, в свою очередь, повышает конкурентоспособность и способствует ресурсосбережению, определяет актуальность, новизну и практическую значимость формирования требований регулирования коррозионной защищенности стальных конструкций [14], исходя из анализа глобального уровня угроз [15, 16].

Выполненный краткий обзор информационных материалов и научных методов обеспечения надежности в строительстве позволяет обозначить цель исследования — определить проектные требования к эксплуатационной пригодности и долговечности на основе принципов процессного подхода к оценке технико-экономических параметров коррозионной защищенности.

Реализация поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- уточнить критерии эксплуатационной пригодности и долговечности, связанные с условиями коррозионной опасности и коррозионной защищенности;
- обосновать коэффициенты надежности, расчетные модели и методы контроля показателей долговечности;
- экспериментально подтвердить соответствие проектных значений коррозионной стойкости и срока службы защитных покрытий стальных конструкций.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Рассмотренные выше технико-экономические аспекты обеспечения долговечности определили необходимость систематизации качественных и количественных требований технического регулирования соответствия средств защиты от коррозии стальных конструкций требуемому уровню надежности здания или сооружения. Стандартом ДСТУ Б В.2.6-193 (далее — стандарт) усовершенствованы понятия и категории в части обеспечения конструктивной приспособленности и качества защитных покрытий при проектировании металлических кон-

струкций. Разработка данного документа выполнена с учетом требования оценивания показателей качества первичной и вторичной защиты исходя из функционального назначения, надежности и технологической безопасности конструкций [17]. При этом меры первичной защиты связаны с повышением коррозионной стойкости за счет формирования необходимых параметров конструктивной приспособленности. Меры вторичной защиты установлены исходя из требуемого срока службы защитных покрытий. Комплексная характеристика ремонтпригодности задана в виде коэффициента готовности мер первичной и вторичной защиты. Поэтому стандартом долговечность определена, как способность конструкций и их защитных покрытий выполнять необходимые функции до момента наступления предельного состояния при заданной системе технического обслуживания и ремонта.

Особенностью стандарта ДСТУ Б В.2.6-193 является положение (п. 4.2), согласно которому обеспечение качества материалов и конструкций, сокращение коррозионных потерь и выбор эффективных средств и методов защиты от коррозии должны предусматривать процессный подход к управлению ресурсами на основе технико-экономических параметров коррозионной защищенности [18, 19]. С точки зрения контроля эффективности проектных решений и достижения заданных эксплуатационных характеристик в документе зафиксирована необходимость выполнения регламентных процедур подтверждения соответствия мер первичной и вторичной защиты показателям гарантированной долговечности. В работе [20] сформулированы достаточные условия безаварийной эксплуатации конструкций в виде классификационных признаков уровня коррозионной опасности (KI–KV) для условий применения метода предельных состояний. Следует особо подчеркнуть, что коррозионная опасность включает определенное состояние или ситуацию (угрозу), при которой увеличивается вероятность наступления ущерба в связи с тем, что данное коррозионное состояние или отклонение от нормальной эксплуатации являются потенциальной причиной (угрозой) наступления опасности или того, что может повлиять на размер ущерба. В связи с этим предложена методика оценки работоспособности корродирующих конструкций с учетом требований процессного подхода к управлению качеством и безопасностью на основе принципов DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) [21]. К сожалению, в действующем стандарте положения DMAIC имеют ограниченное толкование, что не позволяет выполнять оценивание коррозионной защищенности по условиям эксплуатационной пригодности и долговечности.

Исходя из актуальности и практической значимости формирования технико-экономических показателей долговечности стальных конструкций, рассмотрим особенности проектного обоснования системы противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК) в зависимости от требуемого уровня коррозионной защищенности (ZI–ZIV). Область применения проектных положений, связанных с оценением условий коррозионной опасности (защищенности), включает обоснование сроков службы мер первичной и вторичной защиты, долговечности и управления техническим обслуживанием в течение всего ЖЦ конструкций (табл. 1).

Задание надежности СПЗК производится с учетом технико-экономических параметров, определяющих уровень коррозионной опасности (защищенности), категории ответственности средств защиты, класса опасности, степени риска, характеристики потерь и размера потенциального ущерба (вход системы) [21]. Эффективность СПЗК подтверждается установленной процедурой контроля определяющих параметров коррозионного состояния (ОПКС), уровнем технологической безопасности, признаками цикла развития противокоррозионной защиты (выход системы). В работе [14] требования к качеству, надежности и безопасности СПЗК представлены качественными условиями антикризисного (цикл Q1), затратного (цикл Q2), стимулирующего (цикл Q3) или сбалансированного (цикл Q4) регулирования. Использование и управление уровнем надежности СПЗК путем преобразования входов в выходы делает возможным оценку долговечности на основе дифференцированного анализа параметров коррозионной опасности (защищенности) с учетом критериев предельных состояний, реализуемых совместно с методом парциальных коэффициентов надежности.

Систематизация условий оценивания предельных состояний по признакам коррозионной опасности (защищенности) представлена в табл. 2.

В постановке задач обоснования проектных решений СПЗК используются критерии надежности I уровня при раздельном рассмотрении нагрузок, воздействий и несущей способности [20]. Изменчивость воздействий учитывается путем выбора наиболее неблагоприятного сочетания экстремальных значений факторов агрессивной среды γ_{fk} . Состав и интенсивность коррозионных воздействий устанавливаются по данным строительной климатологии, нормативным параметрам коррозионной агрессивности атмосферы, результатам статистической оценки эксплуатационных воздействий рабочих сред A_k , г/м²год. Случайный характер показателей коррозионной стойкости, связанный с природой металлургических факторов, рассматривается для строительных сталей на основе нормального распределения γ_{mk} , обеспечивающего точность оценки параметров процессов износа и старения. Коэффициенты надежности первичной γ_{mk} и вторичной защиты γ_{zn} учитывают конструктивную приспособленность, а также допустимые отклонения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов в зависимости от категории ответственности СПЗК. Коэффициент надежности коррозионного состояния γ_{ef} устанавливает изменение параметров однородных конструктивных элементов. Формирование расчетных моделей и расчетных ситуаций осуществляется топологическими методами по данным анализа причинно-следственных связей СПЗК. Управление технологической безопасностью выполняется на основе анализа рисков R_p , балл, и диагностики живучести T_{kn} , год, с учетом коэффициента обратной связи ψ_m негативных внешних воздействий.

Необходимо отметить, что управление проектными решениями включает отработку спецификаций с учетом заданного уровня надежности СПЗК и результатов подтверждения соответствия ОПКС по данным онлайн и офлайн контроля с использова-

Табл. 1. Обобщенная матрица выбора уровня надежности СПЗК

Table 1. Generalized matrix of choosing the level of reliability index of SCPS

Степень агрессивности воздействий K , мм/год / Degree of exposure corrosiveness K , mm per year	Интервальные оценки коэффициента готовности противокоррозионной защиты K_g / Range estimates of corrosion protection availability factor K_g				
	$0 < K_g \leq 0,1$	$0,1 < K_g \leq 0,3$	$0,3 < K_g \leq 0,5$	$0,5 < K_g \leq 0,7$	$0,7 < K_g \leq 1,0$
Слабоагрессивная / Weak-level corrosive environment, $0,01 < K \leq 0,05$	KI	ZIV	ZIII	ZII	ZI
Низкоагрессивная / Low-level corrosive environment, $0,05 < K \leq 0,15$	KII	KI	ZIV	ZIII	ZII
Высокоагрессивная / High-level corrosive environment, $0,15 < K \leq 0,30$	KIII	KII	KI	ZIV	ZIII
Очень высокоагрессивная / Very high-level corrosive environment, $0,30 < K \leq 0,50$	KIV	KIII	KII	KI	ZIV
Сильноагрессивная / Strong-level corrosive environment, $K > 0,50$	KV	KIV	KIII	KII	KI

Табл. 2. Расчетные показатели обоснования проектных решений по уровню надежности СПЗК

Table 2. Design indicators for justifying the design solutions based on the SCPS reliability level

Критические предельные состояния / Ultimate limit state		Уровень надежности СПЗК / SCPS reliability level	Параметры регулирования расчетных ситуаций / Parameters of regulation of design cases	Обозначение параметра / Parameter designation	Расчетные показатели*/ Design indicators*	
Группа / Group	Требования безопасности / Safety requirements				Коэффициенты надежности / Reliability factors	Эффекты воздействий / Exposure effects
Первая / First	Обеспечение несущей способности / Assurance of load capacity	KI–KV	Конструктивная приспособленность / Structural suitability	1kc	$\gamma_{fk}, \gamma_{mk}, \gamma_{zc}$	A_k
			Коррозионное разрушение / Corrosive failure	1kw	γ_{zf}	—
			Живучесть / Survivability	1kr	ψ_m	T_{kn}
Вторая / Second	Эксплуатационная пригодность / Serviceability	ZI–ZIV	Долговечность / Durability	2kd	γ_{zn}	T_{ky} / T_{zy}
			Технологическая безопасность / Process safety	2ks	—	R_i
			Ремонтопригодность / Repairability	2km	—	K_g

* Примечание: В таблице использованы обозначения:

коэффициентов надежности — по воздействиям (γ_{fk}); по коррозионной стойкости материала (γ_{mk}); первичной защиты (γ_{zc}); вторичной защиты (γ_{zn}); коррозионного состояния (γ_{zf}); обратной связи (ψ_m);

эффектов воздействий — расчетных годовых потерь конструктивного элемента (A_k , г/м²год); ресурса по критерию живучести (T_{kn}); проектного (гарантированного) срока службы первичной/вторичной защиты (T_{ky} / T_{zy} , год); уровня риска технологической безопасности (R_i , балл); коэффициента готовности (K_g).

* Note: The following symbols are used in the table:

reliability factors — based on attacks (γ_{fk}); based on corrosion resistance of material (γ_{mk}); primary protection (γ_{zc}); secondary protection (γ_{zn}); corrosion state (γ_{zf}); feedback (ψ_m);

effects of attacks — of design annual losses of structural elements (A_k , gm per sq.m per year); of life based on survivability criterion (T_{kn}); of design (guaranteed) service life of primary/secondary protection (T_{ky} / T_{zy} , year); of level of process safety risk (R_i , number); of availability factor (K_g).

нием стандартных методов испытаний и измерений (табл. 3).

В целом, согласно условиям EN 1990 (см. С3.2), численные значения коэффициентов надежности и эффекты воздействий могут быть определены одним из двух способов на основе данных: а) многолетнего опыта проектирования; б) статистического анализа экспериментальных результатов и полевых наблюдений.

Анализ требований конструктивной приспособленности произведен методами планирования эксперимента⁹. Параметрическое описание входов и выходов в задаче статистического моделирования коррозионного разрушения выполнено для установления причинно-следственных отношений факторов агрессивности воздействий и конструктивной формы элементов. Реализация ускоренных коррозионных испытаний с использованием дробной реплики 2^{15–10} позволила выявить эффекты взаимодействия факторов коррозионной среды и конструктивных параметров в форме топологической модели

⁹ Королев В.П. Теоретические основы инженерных расчетов стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность // Научные труды ДГАСА. № 1–95. Макевка, 1995. 110 с.

показателя коррозионной стойкости $A_{i,j}$, г/м²год):

$$A_{i,j} = a_0 \sum_{i=0}^{i=N} \sum_{j=0}^{j=L} a_{i,j} / T_k, \quad (1)$$

где a_0 — коррозионные потери образцов стали С235 (г/м²); $a_{i(j)}$ — весовые характеристики эффектов взаимодействия i -го фактора коррозионных воздействий и j -го параметра конструктивной формы; T_k — промежуток времени, соответствующий установившимся значениям коррозионных потерь (год).

Задача оценки технико-экономических показателей долговечности первичной и вторичной защиты (T_{ky} / T_{zy} , год) в течение продолжительного периода времени не имела приемлемого аналитического описания. Управление средствами и методами защиты по требованиям СНиП 2.03.11 осуществлялось путем изменения качественных характеристик категорий размещения конструкций и групп лакокрасочных материалов по назначению.

Разработанный подход к проектированию СПЗК с учетом показателей живучести и долговечности первичной защиты (T_{ky} , год) изложен в работе [20]. Оценивание условия коррозионной защищенности для лакокрасочных покрытий (T_{zy} , год), как

Табл. 3. Этапы и методы подтверждения соответствия качества СПЗК

Table 3. Stages and methods of conformation of compliance of SCPS quality

Этап / Stage	Методы контроля / Methods of monitoring	Типы испытаний / Types of tests	Стандарты / Standards	Результат / Results
Проектирование / Designing	Робастный подход к проектированию, планирование эксперимента DoE / Robust Design, design of experiments DoE			Выбор средств первичной и вторичной защиты на основе подтверждения соответствия допусков вблизи номинальных значений коррозионной стойкости и долговечности заданному уровню надежности СПЗК / The choice of measures of primary and secondary protection based on the confirmation of compliance of tolerances to the specified level of reliability of SCPS closed to the nominal values of corrosion resistance and durability
	Расчетно-измерительный офлайн контроль / Calculation and measurement offline control	Определение коррозионной стойкости металлов и покрытий / Determination of corrosion resistance of metals and coatings	ISO 12944 ГОСТ 13819 / GOST 13819 ГОСТ 9.908 / GOST 9.908 ДСТУ Б В.2.6-193 / DSTU B V.2.6-193 СП 28.13330 / SP 28.13330	
		Определительные испытания несущей способности / Load capacity determination tests	ДСТУ Б В.2.6-10 / DSTU B V.2.6-10	
		Проверка соответствия физико-механических свойств покрытий / Verification of conformity of physical and mechanical properties of coatings	ISO 12944-6 ISO 2409 ГОСТ 9.032 / GOST 9.032 ГОСТ 6806 / GOST 6806 ГОСТ 4765 / GOST 4765 ГОСТ 15140 / GOST 15140 ГОСТ 9.403 / GOST 9.403 ГОСТ 21513 / GOST 21513	
		Ускоренные испытания на коррозионную стойкость и долговечность / Accelerated corrosion resistance and durability tests	ISO 7384 ГОСТ 9.401 / GOST 9.401 ГОСТ 9.308 / GOST 9.308	
Контроль факторов агрессивных воздействий / Monitoring of exposure corrosiveness factors	Развертывание функции качества QFD / Quality function deployment QFD			Идентификация факторов коррозионной агрессивности на основе расчетно-измерительного контроля коррозионных потерь / Identification of factors of corrosiveness based on calculation and measurement control of corrosion losses
	Регистрационный, расчетно-измерительный онлайн контроль / Registration, calculation and measurement online control	Оценка степени агрессивности воздействий / Assessment of exposure corrosiveness degree	ISO 12944-2 ГОСТ 9.039 / GOST 9.039 ГОСТ 9.104 / GOST 9.104 ДСТУ Б В.2.6-193 / DSTU B V.2.6-193 СП 28.13330	
		Определение коррозионных потерь / Determination of corrosion losses	ГОСТ 9.040 / GOST 9.040	
		Определение стойкости покрытий в атмосферных условиях / Determination of coating resistance in the atmospheric conditions	ISO 6270 ГОСТ 6992 / GOST 6992 ГОСТ 9.909 / GOST 9.909 ISO 12944-8	
	Проверка параметров технического состояния / Check-out of technical state parameters	Оценка внешнего вида / Assessment of appearance	ISO 4628 ISO 12944-7 ГОСТ 9.301 / GOST 9.301 ГОСТ 9.302 / GOST 9.302 ГОСТ 9.307 / GOST 9.307 ГОСТ 9.407 / GOST 9.407	Мониторинг технико-экономических рисков и усовершенствование проектных спецификаций путем вариации параметров входа и выхода процесса технического обслуживания СПЗК / Monitoring of technical and economic risks and improvement of design specifications by varying the inlet and outlet parameters of the SCPS maintenance process
		Контроль состояния в агрессивных средах / Monitoring of structural state in corrosive environments	ГОСТ 9.311 / GOST 9.311 Пособие к СНиП 2.03.11 / Manual for SNiP 2.03.11	

критерия эксплуатационной пригодности, основывается на физических моделях потери работоспособности в результате отказа защитных свойств по признакам коррозионной опасности. Регистрационную оценку защитных свойств лакокрасочных покрытий рекомендуется выполнять статистическими методами для аналогичных (однородных) конструктивных элементов в пределах однородных по составу и интенсивности воздействий, зон эксплуатации промышленных и гражданских объектов. Квалиметрический контроль технического состояния вторичной защиты производится по обобщенному показателю защитных свойств A_z с учетом зависимости:

$$A_z = \sum_{i=1}^{i=N} B_i X_i, \quad (2)$$

где B_i — коэффициент весомости вида разрушения; X_i — относительная оценка i -го вида разрушения; i — число видов разрушений.

По нормам ISO 12944-1 уровень разрушения покрытия до первого полного ремонтного окрашивания должен быть согласован между заинтересованными сторонами и подвергнут оценке в соответствии со стандартом с ISO 4628. Согласно установленным требованиям, долговечность противокоррозионной защиты имеет три интервала нормативных значений срока службы покрытий T_{zn} , год: низкий от 2 до 5 лет; средний от 5 до 15 лет; высокий свыше 15.

На основе вышеизложенного, очевидной становится необходимость использования допустимых

отклонений первичной и вторичной защиты при выявлении предельных состояний по признакам коррозионной опасности (защищенности), представленных в табл. 2. Поэтому, согласно требованиям стандарта ДСТУ Б В.2.6-193, вводятся четыре категории ответственности конструкций и их защитных покрытий (П1–П4), связанные с характером последствий коррозионных воздействий. Параметрическое проектирование по заданному уровню надежности предлагается выполнять на основе допусков изменения признаков соответствия эксплуатационной пригодности (табл. 4).

Таким образом, эксплуатационную пригодность по уровню коррозионной защищенности целесообразно устанавливать расчетно-измерительным, регистрационным офлайн контролем (оценкой соответствия) СПЗК с учетом проектных требований спецификации базовых (характеристических) параметров коррозионной стойкости и долговечности. В данном случае основанием для принятия решения о выборе СПЗК является протокол испытаний (заявление поставщика о соответствии). Результаты регистрационного онлайн контроля нацелены на мониторинг уровня риска технологической безопасности и подтверждение соответствия проектных мер технического обслуживания. Расчетно-измерительный онлайн контроль, как правило, связан с критическими ОПКС, вызывает дополнительные затраты на риск-диагностику технического состояния с привлечением специализированных организаций.

Табл. 4. Допуски предельных отклонений ОПКС для категорий ответственности по коррозионной защищенности стальных конструкций

Table 4. Permissible limit deviations of DFCS for categories of criticality based on corrosion protectability of structural steel

Обозначение категории ответственности / Designation of criticality category	Признаки соответствия категории ответственности параметрам работоспособности / Signs of conformity of criticality category with serviceability parameters	Параметры работоспособности / Parameters of serviceability				
		Класс риска СПЗК / SCPS risk class	Критерий отказа защитных покрытий / Criterion of protective coating failure		Коэффициент надежности / Reliability factor	
			A_z	h_k , мкм	γ_{zn}	γ_{zk}
П1 / P1	Допускает снижение декоративных свойств вторичной защиты / Allows degradation of decorative features of secondary protection	3	0,85	–	0,99	0,95
		4	0,90		1,00	0,99
П2 / P2	Не допускает снижения защитных свойств вторичной защиты / Does not allow degradation of protective features of secondary protection	3	0,55	–	0,95	0,90
		4	0,60		0,99	0,95
П3 / P3	Допускает снижение защитных свойств вторичной защиты / Allows degradation of protective features of secondary protection	3	0,40	50	0,90	0,85
		4	0,45	30	0,95	0,90
П4 / P4	Допускает снижение характеристик первичной защиты / Allows degradation of features of primary protection	3	0,30	100	0,85	0,80
		4	0,35	70	0,90	0,85

Приоритет в научно-методических вопросах исследования коррозионной стойкости и долговечности стальных конструкций принадлежит организованной в 1961 г. по инициативе профессора Н.С. Стрелецкого лаборатории стойкости металлических конструкций при кафедре металлических конструкций МИСИ им. В.В. Куйбышева. Данное направление получило развитие в научно-производственной испытательной лаборатории (НПИЛ) «Антикор-Дон» [13], созданной под руководством профессора Е.В. Горохова в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры в 1994 г. (аттестат аккредитации № 211 в Системе сертификации УкрСЕПРО).

Материалы исследований авторов данной статьи отражают результаты работы испытательной лаборатории (ИЛ) «Антикор-Дон» Донбасского центра технологической безопасности (г. Макеевка) ООО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского», аккредитованной по требованиям ДСТУ ISO/IEC 17025 (сертификат № 2Т 773).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В контексте требований качества, надежности и безопасности строительных металлоконструкций [14] первостепенное значение приобретает оценивание расчетных критериев несущей способности ($1kc$, $1kw$, $1kr$) [20] и эксплуатационной пригодности ($2kd$, $2ks$, $2km$) [21], среди которых наибольшую сложность вызывают методические вопросы анализа долговечности вторичной защиты [19]. Указанное обстоятельство напрямую связано с широким ассортиментом лакокрасочной продукции и возрастающими запросами потребителей в отношении гарантийных обязательств в металлостроительстве. Проектный срок службы (T_{Σ} , год) и коэффициент готовности (K_g) СПЗК во многом зависят от достоверности результатов определительных (ускоренных, стендовых) испытаний защитных покрытий. Вместе с этим действующие стандартные методики, ориентированные на способ измерения, не отражают принципы статистических оценок расчетных характеристик предельных состояний. Принимая во внимание важность данного положения, рас-

смотрим конкретный пример оценки соответствия долговечности защитных покрытий требованиям проектного уровня надежности СПЗК.

Объектом исследования являлись защитные покрытия на основе протекторного спецсостава ZINTEC® (ТУ У 20.3-38168926-001), ускоренные коррозионные испытания которых выполнены ИЛ «Антикор-Дон» в соответствии с заявкой ООО «НПЦ Теплоантикорзащита» на проведение сертификации продукции по требованиям СНиП 2.03.11 (п.п. 5.16, 5.19, табл. 29, Приложение 14). Покрытие ZINTEC® — тонкопленочное покрытие холодного цинкования, предназначенное для противокоррозионной защиты наружных и внутренних поверхностей промышленного оборудования и металлических конструкций, обеспечивает одновременно активную (катодную) и пассивную (барьерную) защиту от коррозии.

Программой испытаний определены три системы защитных покрытий ZINTEC® в соответствии с условиями маркировки табл. 29 СНиП 2.03.11: СПЗК1 — один слой материала (40–60 мкм), [Па-2 (55)]; СПЗК2 — два слоя (70–90 мкм), [Па, Па-3 (80)]; СПЗК3 — три слоя (100–120 мкм), [Па-4 (110)]. Оценка долговечности систем покрытий на основе состава ZINTEC® выполнялась в соответствии с ISO 12944-2. Задание условий и продолжительность испытаний покрытий на основе ZINTEC® представлены в табл. 5.

Согласно ISO 12944-6 воздействия в камере непрерывной конденсации осуществлялись при температуре 40 ± 3 °C и относительной влажности 100 %. В испытательной камере соляного тумана STS-9MS распыление 5%-го раствора хлористого натрия выполнялось при температуре 35 ± 2 °C, относительной влажности 95–98 % (рис. 1, а). Циклическое воздействие в аппарате искусственного старения производилось с помощью устройства для подачи двуокиси серы с концентрацией 5 мг/м³ (рис. 1, б).

Контроль степени агрессивности воздействий выполнялся гравиметрическим методом на образцах-«свидетелях» из стали С235 в соответствии с указаниями ГОСТ 9.908-85. Определение

Табл. 5. Режим онлайн контроля долговечности защитных покрытий по ISO 12944-6

Table 5. Mode of offline control of protective coating durability according to ISO 12944-6

Коррозионная категория по ISO 12944-2 / Corrosion category according to ISO 12944-2 Срок службы / Service life	Продолжительность, час / Duration, hour		
	Камера влаги, непрерывная конденсация, ISO 6270 / Humidity chamber, continuous condensation, ISO 6270	Камера соляного тумана, ISO 7253 / Salt fog chamber, ISO 7253	Камера сернистого газа ISO 3231 / Sulfurous gas chamber ISO 3231
C5-1 Высокий (длительный) / Long-term (extended)	720	1440	720 (30 циклов) / (30 cycles)



Рис. 1. Ускоренные испытания на искусственное старение защитных покрытий при воздействии: *a* — соляного тумана; *b* — двуокиси серы

Fig. 1. Accelerated tests for artificial ageing of protective coatings under exposure to: *a* — salt fog; *b* — sulfur dioxide

степени разрушения окрашенной поверхности производилось по ISO 4628. Определение адгезии выполнено методом решетчатых надрезов по ISO 2409. Классификация класса долговечности СПЗК по экспериментальным данным минимальных значений защитных свойств и адгезии, полученным после искусственного старения покрытий, представлена в табл. 6.

Обоснование допусков предельных отклонений ОПКС (см. табл. 4) позволяет назначать критерии отказов, связанные с исчерпанием защитных свойств покрытий для приемлемых категорий ответственности по коррозионной защищенности и уровню надежности СПЗК. Как известно, процесс физико-химической деструкции покрытий зависит

от группы лакокрасочных материалов (системы покрытия) и определяется промежутками времени проникновения коррозионных агентов к стальной поверхности, задержки (ингибирования) и достижения критического значения отказа защитных свойств, см. формулу (2).

Рассмотрим возможности EN1990 в части проектирования с применением коэффициентов и методов надежности первого порядка (FORM) для анализа коррозионной защищенности стальных конструкций. Проектные решения рассматриваются как достаточные, если расчетный критерий долговечности не превышает срок службы покрытий, установленный в результате определительных (ускоренных, стендовых) испытаний. Это положение может быть

Табл. 6. Результаты офлайн контроля проектных требований к защитным покрытиям ZINTEC® классу долговечности по ISO 12944-1

Table 6. Results of offline control of compliance of ZINTEC® protective coatings with design requirements by durability class according to ISO 12944-1

Категория коррозионной активности по ISO 12944-2 / Corrosivity category according to ISO 12944-2	Класс долговечности по ISO 12944-1 / Durability class according to ISO 12944-1		
	Обозначение СПЗК / Designation of SCPS		
	Маркировка по требованиям СНиП 2.03.11 (табл. 29) / Marking according to SNiP 2.03.11 (table 29)		
	СПЗК1/IIa-2 (55) / SCPS1/IIa-2 (55)	СПЗК2/IIa, IIIa-3 (80) / SCPS2/IIa, IIIa-3 (80)	СПЗК3/IIa-4 (110) / SCPS3/IIa-4 (110)
C2	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)
C3	Средний (5–15 лет) / Medium (5–15 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)
C4	Низкий (2–5 лет) / Low (2–5 years)	Средний (5–15 лет) / Medium (5–15 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)
C5-1	–	Низкий (2–5 лет) / Low (2–5 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)
C5M	–	Низкий (2–5 лет) / Low (2–5 years)	Высокий (свыше 15 лет) / High (over 15 years)

записано следующим образом:

$$T_{zn} \leq T_{zy} \leq \gamma_{zn} T_{zr}, \quad (3)$$

где T_{zn} — нормативный срок службы защитных покрытий (год); T_{zy} — гарантированный проектный срок службы защитных покрытий (год) с доверительной вероятностью $\gamma = 0,95$; T_{zr} — характеристическое значение срока службы защитных покрытий по данным определительных испытаний (год); γ_{zn} — коэффициент надежности противокоррозионной защиты.

Ниже приводится методика определения гарантированного срока службы (T_{zy} , год) для покрытий СПЗК2/[Па, IIIa-3 (80)] на основе расчетно-измерительной оценки коррозионной защищенности при проведении стендовых испытаний (рис. 2).

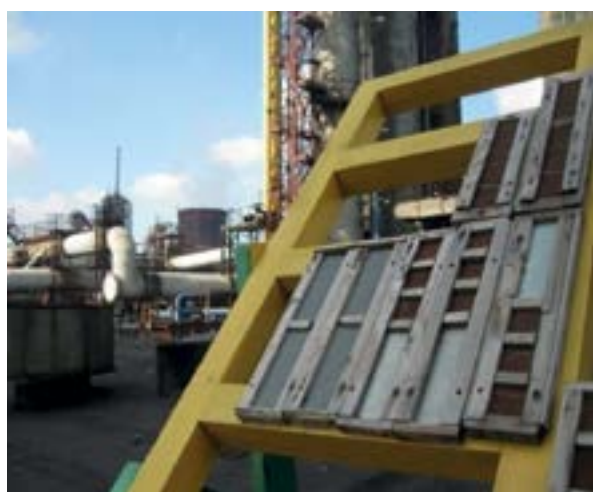


Рис. 2. Стендовые определительные испытания на долговечность СПЗК в промышленной атмосфере

Fig. 2. Bench determinative tests for SPCS durability in the industrial environment

Оценка результатов онлайн контроля долговечности (табл. 7) производилась статистическими методами с учетом нормального распределения, кото-

рое использовалось для анализа репрезентативных характеристик коррозионной стойкости (A_{nr} , г/м²) и обобщенного показателя защитных свойств A_{zr} .

Определительные (ускоренные, стендовые) испытания позволяют получить статистические данные изменения коррозионной защищенности, установленные в момент отказа покрытий, назначенного с учетом допусков предельных отклонений ОПКС путем оценки контрольного норматива коррозионных потерь на эталонных образцах незащищенной стали С235. Сущность разработанной методики анализа коррозионной защищенности заключается в аналитическом описании ОПКС, что создает возможность обоснования контрольного норматива коррозионных потерь (K_p , г/м²) и гарантированного проектного срока службы (T_{zy}) для заданной категории ответственности и уровня надежности СПЗК. При определении характеристики режима испытаний (A_{nr} , г/м²) во внимание принимаются относительная погрешность, размер выборки, доверительная вероятность и значение коэффициента вариации репрезентативных данных.

В целом, разработанная методика оценивания эксплуатационной пригодности и долговечности регламентирует условия расчетно-измерительного контроля коэффициентов надежности (γ_{zk} , γ_{zn}), степени агрессивности (A_{nr} , г/м²) и контрольного норматива отказа системы защитного покрытия (K_p , г/м²) с учетом требований определительных (ускоренных по ГОСТ 9.401, стендовых по ГОСТ 6992) испытаний.

Таким образом, характеристическое значение срока службы защитных покрытий по данным определительных испытаний (T_{zr} , год) можно представить в виде зависимости:

$$T_{zr} = \exp[(\ln K_p - \ln A_n) / c], \quad (4)$$

где c — коэффициент кинетики коррозионного разрушения стали С235.

Очевидным является понимание того, что гарантированный (проектный) срок службы отражает

Табл. 7. Режим онлайн контроля долговечности защитных покрытий по ГОСТ 6992

Table 7. Mode of online control of protective coating durability according to GOST 6992

Степень агрессивности воздействий по СНиП 2.03.11 / Degree of exposure corrosiveness according to SNiP 2.03.11 Характеристическое значение годовых коррозионных потерь стали С235, A_n , г/м ² / Characteristic value of annual corrosion losses of steel С235, A_n , gm per sq.m	Продолжительность стендовых испытаний, T_r , год / Duration of bench tests, T_r , year	Параметры коррозионной защищенности: метод оценки / Parameters of corrosion protectability: estimation method / Функция изменения показателя / Function of indicator changing	
		Степень агрессивности режима испытаний (коррозионная стойкость), A_{nr} , г/м ² / Degree of corrosiveness of test mode (corrosion resistance), A_{nr} , gm per sq.m	Обобщенный показатель защитных свойств, A_{zr} / Generalized indicator of protective properties, A_{zr}
Среднеагрессивная / Medium-level corrosive environment 400–3900	5	ГОСТ 9.908 / GOST 9.908	ГОСТ 9.407 / GOST 9.407
		$A_{nr} = 1250 T_r^{0,55}$	$A_{zr} = 1 - 0,27 \ln T_r$

требования подтверждения соответствия заданных показателей качества и надежности, а гарантийный (контрактный) срок обуславливает договорные обязательства сторон при выполнении противокоррозионных работ. Практический пример, основанный на результатах онлайн контроля долговечности покрытий ZINTEC®, при проведении стендовых испытаний коррозионной защищенности СПЗК2 — два слоя (70–90 мкм) [IIa, IIIa-3 (80)] представлен в табл. 8.

Сравнительный анализ данных офлайн (см. табл. 6) и онлайн (см. табл. 8) контроля подтверждает достаточную близость результатов определительных испытаний показателей коррозионной защищенности. Гарантированный проектный срок службы ($T_{зр}$, год), обоснованный расчетным методом с использованием характеристических значений ($T_{зр}$, год) и заданных коррозионных воздействий (A , г/м²) для СПЗК2 [IIa, IIIa-3 (80)], устраняет неопределенность интервальной оценки нормативного срока ($2 \leq T_{zn} \leq 5$) для среднеагрессивных сред ($400 \leq A_n \leq 3900$) согласно рекомендациям ДСТУ Б В.2.6-193 (табл. K1). Указанные обстоятельства повышают эффективность мер по мониторингу и диагностике коррозионного состояния в процессе технического обслуживания строительных объектов. Вместе с этим допуски предельных отклонений ОПКС (методы оценки по ГОСТ 9.908, ГОСТ 9.407) позволяют управлять расчетным сроком службы покрытий путем задания критериев отказа по категории ответственности СПЗК. Использование при

проектировании СПЗК характеристических значений годовых коррозионных потерь стали С235 (A_{nr} , г/м²) и срока службы покрытий ($T_{зр}$, год) обеспечивает уровень надежности, требуемый для заданных параметров регулирования расчетной ситуации по признакам предельных состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика обоснования проектных решений по защите от коррозии с учетом уровня надежности стальных конструкций и их защитных покрытий. Предложены расчетные критерии офлайн и онлайн контроля параметров эксплуатационной пригодности и долговечности, гармонизированные с положениями национальных и международных стандартов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований доказали возможность регулирования коррозионной защищенности на основе признаков предельных состояний, исходя из конструктивной прочности, эксплуатационной пригодности и долговечности. Рассмотрены практические примеры средств и методов подтверждения соответствия качества и надежности систем противокоррозионной защиты конструкций.

Параметрическое проектирование мер первичной и вторичной защиты от коррозии обеспечивает процессный подход к управлению циклами технико-экономической защищенности [14], устраняет угрозы коррозионного разрушения стальных конструкций и способствует реализации задач внедре-

Табл. 8. Расчетные критерии онлайн контроля эксплуатационной пригодности и долговечности СПЗК2 [IIa, IIIa-3 (80)]
Tab. 8. Design criteria of online control of serviceability and durability SCPS2 [IIa, IIIa-3 (80)]

Степень агрессивности воздействий по ДСТУ Б В.2.6-193 / Degree of exposure corrosiveness according to DSTU B V.2.6-193 Характеристическое значение годовых кор- розионных потерь стали C235 A_n , г/м ² / Charac- teristic value of annual corrosion losses of steel C235 A_n , gm per sq. m	Категория ответствен- ности СПЗК / Criti- cality category of SCPS	Проектные показатели долговечности СПЗК				
		Контроль- ный норматив отказа СПЗК K_p , г/м ² / Benchmark of SCPS failure K_p , gm per sq.m	Расчетное значе- ние коррозион- ных потерь A , г/м ² / Design value of corrosion losses A , gm per sq.m	Коэффициент надежности / Reliability factors		Характеристическое значение срока службы покрытий $T_{зr}$, год / Char- acteristic value of coating service life $T_{зr}$, year Нормативный срок T_{zn} , год, по ДСТУ Б В.2.6- 193 / Rated service life T_{zn} , year, according to DSTU B V.2.6-193
				γ_{zk}	γ_{zn}	
Низкоагрессивная среда / Low-level corrosive envi- ronment 400–650	П4 / P4	4750	625	0,85	0,90	$\frac{27}{2 \leq T_{zn} \leq 5}$
Высокоагрессивная сре- да / High level corrosive environment 650–1500			1300			$\frac{11}{2 \leq T_{zn} \leq 5}$
Очень высокоагрессив- ная среда / Very high-lev- el corrosive environment 1500–3900			1900			$\frac{5}{2 \leq T_{zn} \leq 5}$

ния ресурсосберегающих материалов и технологий. Практическая ценность результатов связана с разработкой регламентных процедур, позволяющих производить информационно-аналитическую обработку данных коррозионной защищенности на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов. Внедрение принципов процессного подхода позво-

лит сократить потери от коррозии на 5–15 %, создаст условия конкурентоспособности для малого и среднего бизнеса, ограничит неопределенность противоправного использования финансовых, материальных и производственных ресурсов, повысит эффективность защитных механизмов поддержки качества, надежности и безопасности строительных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korolov V., Vysotsky Y., Gibalenko O., Korolov P. Estimation of steel structure corrosion risk level // EUROCORR-2010. Moscow, 2010. 534 p.
2. Коряков А.С., Евстафьева Е.Б. Современное состояние светопрозрачных конструкций Шухова // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 84–92. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.84-92
3. Филиппов В.В., Бережнов К.П. Оценка долговечности металлических конструкций производственных зданий с учетом деградации механических свойств сталей из-за коррозии // Наука и образование. 2016. № 4. С. 83–88.
4. Nowak A.S., Kozikowski M., Lutomirska M. Risk mitigation for highway and railway bridges // Report # MATC-UNL: 224 Final Report. Department of Civil Engineering University of Nebraska-Lincoln, 2009. 24 p.
5. Helsel J.L., Reina M., Lanterman R. Expected service life and cost considerations for maintenance and new construction protective coating work // CORROSION 2014. Paper 4088. NACE International. Houston, TX.
6. Zhong X.P., Zhu J., Yuan C.B., Jin W.L., Xia J. Durability design based on serviceability stage for corroded reinforced concrete structures // Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. Paper Number DDS01. University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom, 2018.
7. Perneta H., Correia M.J., Salta M. Corrosion protection of steel structures // ICDS12- International Conference Durable Structures. Lisbon, Portugal, 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/268522000>
8. Hegyi A., Constantinescu H., Cazan O., Barbos G. Comparative analysis of costs for the corrosion protection over the whole service life of steel structures // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences. 2015. Vol. 8 (57). No. 1. Pp. 51–58.
9. Kere K.J., Huang Q. Life-Cycle Cost Comparison of Corrosion Management Strategies for Steel Bridges // Journal of Bridge Engineering. 2019. Vol. 24. Issue 4. P. 04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001361
10. Cost of Corrosion. URL: <https://www.rustbullet.com/.../cost-of-corrosion>
11. Kowalski D., Grzyl B., Kristowski A. The Cost Analysis of Corrosion Protection Solutions for Steel Components in Terms of the Object Life Cycle Cost // Civil and Environmental Engineering Reports. 2017. Vol. 26. Issue 3. Pp. 5–13 DOI: 10.1515/ceer-2017-0031
12. Arriba-Rodriguez L., Villanueva-Balsera J., Ortega-Fernandez F., Rodriguez-Perez F. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review // Metals. 2018. Vol. 8. Issue 5. P. 334. DOI: 10.3390/met8050334
13. Логанина В.И., Учаева Т.В. Статистическая оценка риска причинения вреда при несоответствии качества лакокрасочных покрытий // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 11. С. 1449–1455. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1449-1455
14. Королев В.П. Требования качества, надежности и безопасности для управления коррозионной защищенностью металлоконструкций и сооружений // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т. 4. № 3. С. 24–32. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf>
15. Теличенко В.И. Комплексная безопасность строительства // Вестник МГСУ. 2010. № 4–1. С. 10–17.
16. Шимановский А.В. и др. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений. К.: Сталь, 2008. 463 с.
17. Рыженков А.А., Королев В.П. Требуется защита. О менеджменте качества противокоррозионной защиты металлических конструкций // Металл. 2006. № 9 (81). С. 32–37. URL: <https://readmetal.com/?p=12795>
18. Korolov V., Vysotsky Yu., Filatov Yu., Korolov P. Risk Assessment and Quality Assurance of Corrosion Protection for Steel Structures of Industrial Facilities // EUROCORR-2013. Paper 1207. Estoril, Portugal, 2013. 719 p.
19. Korolov V., Filatov Yu., Magunova N., Korolov P. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level // Journal of Materials Science and Engineering B. 2013. Vol. 3. Issue 11. DOI: 10.17265/2161-6221/2013.11.008
20. Королев В.П., Куценко И.В. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструк-

ций // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 37–42.

21. Королев В.П. Методический подход к обеспечению работоспособности металлоконструкций

в условиях коррозионной опасности // Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 70–82. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-70-82

Поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

О Б АВТОРАХ: Владимир Петрович Королев — доктор технических наук, профессор, научный руководитель Научно-образовательного центра (НОЦ) «Техноресурс»; Приазовский государственный технический университет (ПГТУ); 87500, Украина, г. Мариуполь, ул. Университетская, д. 7.; center_sts@ukr.net;

Галина Анатольевна Герман — кандидат технических наук, член подкомитета ПК-4 «Противокоррозионная защита в металлостроительстве» технического комитета ТК-301 «Металлостроительство»; Приазовский государственный технический университет (ПГТУ); 87500, Украина, г. Мариуполь, ул. Университетская, д. 7.; center_sts@ukr.net.

REFERENCES

1. Korolov V., Vysotsky Y., Gibalenko O., Korolov P. Estimation of steel structure corrosion risk level. *EUROCORR-2010*. Moscow, 2010; 534.
2. Koryakov A.S., Evstaf'eva E.B. Modern State of Shukhov's Translucent structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 12:84-92. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.84-92 (rus.).
3. Filippov V.V., Berezhnov K.P. Assessment of durability of metal constructions of industrial build-ings with taking into account corrosion-related degradation of mechanical properties of steel. *Science and Education*. 2016; 4:83-88. (rus.).
4. Nowak A.S., Kozikowski M., Lutomirska M. Risk Mitigation for highway and railway bridges. *Report # MATC-UNL: 224 Final Report*. Department of Civil Engineering University of Nebraska-Lincoln, 2009; 24.
5. Helsel J.L., Reina M., Lanterman R. Expected service life and cost considerations for maintenance and new construction protective coating work. *CORROSION 2014*. Paper 4088. NACE International. Houston, TX.
6. Zhong X.P., Zhu J., Yuan C.B., Jin W.L., Xia J. Durability design based on serviceability stage for corroded reinforced concrete structures. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. Paper Number DDS01*. University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom, 2018.
7. Perneta H., Correia M.J., Salta M. Corrosion protection of steel structures. *ICDS12 — Durable Structures*. Lisbon, Portugal, 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/268522000>
8. Hegyi A., Constantinescu H., Cazan O., Barbosa G. Comparative analysis of costs for the corrosion protection over the whole service life of steel structures. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2015; 8(57)(1):51-58.
9. Kere K.J., Huang Q. Life-cycle cost comparison of corrosion management strategies for steel bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2019; 24(4):04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001361
10. Cost of corrosion. URL: <https://www.rustbullet.com/.../cost-of-corrosion>
11. Kowalski D., Grzyl B., Kristowski A. The cost analysis of corrosion protection solutions for steel components in terms of the object life cycle cost. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2017; 26(3):5-13. DOI: 10.1515/ceer-2017-0031
12. Arriba-Rodriguez L., Villanueva-Balsera J., Ortega-Fernandez F., Rodriguez-Perez F. Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: A Review. *Metals*. 2018; 8(5):334. DOI: 10.3390/met8050334
13. Loganina V.I., Uchaeva T.V. Statistical assessment of damnification risk due to inconformity of paint coating quality. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(11):1449-1455. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1449-1455 (rus.).
14. Korolov V.P. Quality, reliability and safety requirements for management of corrosion protection of structural steel and installations. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2018; 4(3):24-32. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf> (rus.).
15. Telichenko V.I. Complex safety of building. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-1:10-17. (rus.).
16. Shimanovsky A.V. et al. Technical diagnostics and prevention of accident cases for buildings and in-stallations. Steel Publishing House, 2008. 462. (rus.).

17. Korolov V.P., Ryzhenkov A.A. Protection is needed. On management of quality of structural steel corrosion protection. *Metal*. 2006; 9(81):32-37. URL: <https://readmetal.com/?p=12795> (rus.).

18. Korolov V., Vysotsky Y., Filatov Y., Korolov P. Risk Assessment and quality assurance of corrosion protection for steel structures of industrial facilities. *EUROCORR-2013*. Paper 1207. Estoril, Portugal, 2013; 719.

19. Korolov V., Filatov Yu., Magunova N., Korolov P. Management of the quality of corrosion protec-

tion of structural steel based on corrosion risk level. *Journal of Materials Science and Engineering B*. 2013; 3(11). DOI: 10.17265/2161-6221/2013.11.008

20. Korolov V.P. Kushchenko I.V. Standard regulation of reliability and safety of corrosion protection systems of metal structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 1:37-42. (rus.).

21. Korolov V.P. Methodical approach to assuring structural steel serviceability under corrosion hazard. *Building and Reconstruction*. 2019; 4(84):70-82. DOI: 10.33979 / 2073-7416-2019-84-4-70-82 (rus.).

Received February 17, 2020.

Adopted in a revised form on March 7, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

B I O N O T E S: **Vladimir P. Korolyov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Research Manager of “Tekhnoryesurs” Research and Educational Center; **Priazovsky State Technical University**; 7 Universitetskaya st., Mariupol, 87500, Ukraine; center_sts@ukr.net;

Galina A. German — Candidate of Technical Sciences, member of PK-4 Corrosion Protection in Metal Construction of Technical Committee TC-301 Metal Construction; **Priazovsky State Technical University**; 7 Universitetskaya st., Mariupol, 87500, Ukraine; center_sts@ukr.net.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 504.75

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.533-552

Экологическая безопасность жилых и общественно-деловых зон с позиции мониторинга PM_{2.5}, PM₁₀ на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*)

И.Ю. Глинянова, В.Н. Азаров

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мелкодисперсная пыль представляет определенные риски для здоровья человека в населенных пунктах. Предмет исследования — пылевидные частицы на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в жилой зоне Среднеахтубинского района Волгоградской области (зона застройки индивидуальными жилыми домами и малоэтажными жилыми домами блокированной застройки) и в общественно-деловой зоне (зона размещения объектов социального назначения) вблизи предприятий стройиндустрии, машиностроения и другими в сравнении с дисперсионным составом пыли на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*), произрастающих на территории дачных и садоводческих объединений в условно чистой зоне (контроль) при отсутствии техногенной нагрузки со стороны промышленных комплексов (СНТ «Орошенец», г. Волгоград, Советский район). Цель исследования — изучение дисперсного состава пыли и выявление мелкодисперсной пыли PM_{2.5} и PM₁₀ на фитомониторах в жилой зоне. Задачи — отбор пылевидных частиц на листьях растений, анализ пыли, выявление районов экологических рисков.

Материалы и методы. Материал изучения — листья абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в жилой и общественно-деловой зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области и в СНТ «Орошенец», г. Волгоград, Советский район, условно чистая зона (контроль). Методы исследования: смыв пыли с листовых пластинок в химический стакан с дистиллированной водой, фильтрация суспензии через фильтр АФА-ВП, получение фильтрата, естественная сушка фильтрата при температуре не выше 30–40 °С, размещение высушенного фильтрата на предметное стекло оптического микроскопа. Исследование дисперсного состава пыли производилось согласно п. 11–13 ГОСТ Р 56929-2016.

Результаты. Выявили территории экологического риска в жилой и общественно-деловой зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области (ул. Больничная, жилые постройки по ул. Нечаевой, Омской, детский садик по ул. Кавказской: PM_{2.5}, PM₁₀) и места, безопасные для проживания (школа-интернат по ул. Воровского: PM₁₀ — 20 мкм и 20–40 мкм).

Выводы. Требуется дальнейшие исследования в жилой и общественно-деловой зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области, определение химического состава пылевидных частиц и установление источника загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью, разработка мероприятий экологической направленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пылевидные частицы, дисперсный состав, PM_{2.5}, PM₁₀, мелкодисперсная пыль, фитомониторинг, биомониторы, жилая зона, экологические риски, техногенные нагрузки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глинянова И.Ю., Азаров В.Н. Экологическая безопасность жилых и общественно-деловых зон с позиции мониторинга PM_{2.5}, PM₁₀ на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 533–552. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.533-552

Environmental safety of residential and public areas in the context of PM_{2.5}, PM₁₀ monitoring on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*)

Irina Yu. Glinyanova, Valery N. Azarov

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Fine dust puts human health at risk in populated areas. The research is focused on dust particles on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*) in the residential area of the Central Akhtubia district of the Volgograd region (the area of single family houses and low rise townhouses) and in the public area (the area of public amenities) located in close proximity to construction and development enterprises, machine builders, etc. as compared to the dispersion composition of dust on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*) in the territory occupied by rural housing communities in the conditionally clean zone (the benchmark zone) in absence of any man-induced loadings coming from industrial facilities (Oroshenets gardeners' non-commercial partnership, Volgograd, Soviet district). The goal of the research is to study the dispersion composition of

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15, Выпуск 4, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 4, 2020

dust and to identify fine dust PM2.5 and PM10 using plant monitoring systems in the residential area. The objectives include the sampling of dust particles from plant leaves, dust analysis, and identification of areas exposed to ecological risks.

Materials and methods. The leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*), growing in residential and public areas of the Central Akhtubia district of the Volgograd region and in the territory of Oroshenets gardeners' non-commercial partnership, Volgograd, Soviet district (the conditionally clean benchmark zone) represent the study material. Methods of research include leaf wash into the beaker full of distilled water, suspension filtration using AFA-VP analytical filter, filtrate production and natural drying at the temperature not exceeding 30–40 °C, and placement of the dried filtrate on the slide of an optical microscope. The distribution of dust particles was performed pursuant to State Standard of Russia 56929-2016.

Results. The co-authors have identified the zones exposed to ecological risks in residential and public areas of the Central Akhtubia district of the Volgograd region (Bolnichnaya st., residential houses in Nechayeva, Omskaya streets, a kindergarten in Kavkazskaya st.: PM2.5, PM10) and safe residential areas (a boarding school in Vorovskogo st.: PM10 — 20 µm and 20–40 µm).

Conclusions. Further studies of residential and public areas of the Central Akhtubia district of the Volgograd region are to be performed to identify the chemical composition of dust particles and the source of fine dust polluting the air and to develop a roadmap of environmental actions.

KEYWORDS: dust particles, distribution of dust particles, PM2.5, PM10, fine dust, plant monitoring, biological monitoring, residential area, ecological risks, man-induced loading

FOR CITATION: Glinyanova I.Yu., Azarov V.N. Environmental safety of residential and public areas in the context of PM2.5, PM10 monitoring on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):533-552. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.533-552 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Исследование дисперсного состава пыли в атмосферном воздухе городских агломераций позволяет спрогнозировать реальную экологическую ситуацию и при необходимости разработать ряд мероприятий для улучшения качества жизни и снижения риска заболеваемости населения.

До недавнего времени считалось, что «пылевидные частицы больше 5 мкм не представляют угрозу для здоровья человека, они легко задерживаются в носовой полости и не проходят внутрь организма»¹, «пыль же размером меньше 5 мкм наиболее опасна для человека» [1].

Как показывают многочисленные исследования последних лет, выполненные учеными в разных странах мира, PM2.5 и PM10 являются источниками возникновения различного рода заболеваний человека. Так, R.S. Wu, L.J. Zhong, X.L. Huang, H.B. Xu и др. обнаружили связь между мелкодисперсной пылью (PM2.5, PM10) и смертностью в возрасте 65 лет от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания в Китае [2]. G. Cesar, A. Cristina, L. Nascimento продемонстрировали влияние PM10 на госпитализацию детей из-за респираторных заболеваний [3].

Mehdi Mokhtari, Mohammad Miri, Hassan Khorsandi и др. констатировали высокие показатели преждевременной смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний, связанных

с PM10 и PM2.5 в Йезде (Иран) [4]. A.J. Cohen и др. подтвердили существенный рост заболеваемости и смертности, связанный с загрязнением воздуха PM10 за последние 25 лет [5].

R. Rumi, S. Ghosh, P.K. Padhy и др. выявили изменения гематологических параметров, а также окислительный стресс у сельских женщин из племенных районов на северо-востоке Индии, подверженных воздействию PM10 и PM2.5 [6].

G. Meng, B. Gufran, S. Shaojie и другие авторы рассчитали ежегодные изменения смертности населения и ожидаемой продолжительности жизни в зависимости от провинции из-за выбросов загрязняющих веществ при выработке электроэнергии, которые генерируют в окружающую среду PM2.5 [7].

T. Chan, Z. Zhang, B. Lin и др. исследовали зависимость от долгосрочного воздействия PM2.5 в окружающей среде и хронического заболевания почек у населения [8].

L.S. Fagundes, F. Alan da Silveira, A.C. Zanchi и др. доказали в своих лабораторных экспериментах, что при прямых контактах с PM2.5 увеличивается окислительный стресс в различных структурах мозга крыс [9]. J.Y. Ljubimova, O. Braubach, R. Patil также подтвердили воздействие PM2.5 на мозг животных и выявили, что PM2.5 и PM10 в воздухе, например, Лос-Анджелеса, вызывают экспрессию биомаркеров воспаления и рака в мозге крыс [10].

Z.J. Andersen, M. Pedersen, G. Weinmayer и др. нашли убедительные доказательства связи между длительным воздействием поглощения PM2.5 из атмосферного воздуха, которое обусловлено дорожным движением и развитием злокачественных опу-

¹ Коузов П.А. Основы анализа дисперсионного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987. С. 5.

хелей головного мозга среди городского населения ряда европейских стран (Голландия, Швеция, Италия, Австрия, Дания и др.) [11].

М. Dolci, С. Favero, V. Bollati и др. установили воздействие PM_{2.5} и PM₁₀ на увеличение репликации полиомавируса JC в организме человека [12].

Исходя из проанализированных работ, размер частиц оказывает важное влияние на здоровье населения, поэтому исследование дисперсного состава пылевидных частиц в городской среде является актуальной темой.

Мониторинг пыли в атмосферном воздухе городских территорий осуществляется традиционно забором атмосферного воздуха за определенный промежуток времени и идентификацией мелкодисперсной пыли, загрязняющих веществ в пробах воздуха. При этом стоит отметить, что наряду с традиционным способом исследования пылевидных частиц в атмосферном воздухе городской среды (Н.В. Зайцева, И.В. Май, А.А. Макс, С.Ю. Загороднов, 2013; К.С. Голохваст, 2013; К.С. Голохваст, И.Л. Ревущая и др., 2016; И.А. Просвирыкова, Л.М. Шевчук, 2018; В.Н. Азаров, И.В. Стефаненко и др., 2018 и др.) существует большое количество опытно-экспериментальных исследований, посвященных фитомониторингу городских территорий, а именно изучению пылевидных частиц и их характеристик, собранных на листьях растений (О.В. Чернышенко, 2012; М. Zampieri, J. Sarkis, Pestana, C. Rafael, 2013; Л.И. Аткина, М.В. Игнатова, 2014; A. Przybysz, A. Saebo, H. Hanslin, 2014; G. Sgrigna, A. Saebo, S. Gawronski, 2015; S. Janhall, 2015; Y. Song, B. Maher, F. Li, 2015; J. Shi, G. Zhang, H. An, 2017; L. Lin, J. Yan, K. Ma, 2017; T. Zhang, Y. Bai, X. Hong, 2017; Y. Xu, W. Xu, L. Mo, 2018; U. Weerakkody, J.W. Dover, P. Mitchell, 2018; S. Singh, P. Bhattacharya, N. Gupta, 2018; L. Lin, G. Chen, J. Yan, 2018; A. Przybysz, G. Nersisyan, S. Gawronski, 2019 и др.

Анализ работ по фитомониторингу отечественных и зарубежных авторов позволяет сделать вывод о том, что листья растений служат отличными индикаторами и пассивными биомониторами мелкодисперсной пыли в атмосферном воздухе городских территорий. Адсорбируя ежедневно большое количество пылевидных частиц, витающих в атмосферном воздухе, листовые пластинки растений отражают реальную экологическую ситуацию в исследуемом районе, поскольку обладают свойством накапливать пыль на своей поверхности в течение определенного промежутка времени. Изучение дисперсного состава пыли на листьях растений на примере листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) может дать объективную картину экологической ситуации в жилой зоне. Гипотезой данного научного исследования является следую-

щее: исследование дисперсного состава на листьях деревьев на примере листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) жилой зоны в Среднеахтубинском районе Волгоградской области позволит выявить территории экологического риска и безопасные места для проживания.

Цель данной работы — исследование дисперсного состава пылевидных частиц на листьях растений на примере абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*), произрастающих в жилой зоне Среднеахтубинского района Волгоградской области.

Задачи исследования:

- мотивация выбора жилой зоны, определение точек отбора проб и материала изучения;
- сбор листьев с абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в жилой зоне в выбранных точках отбора проб и в условно чистой зоне (контроль) в СНТ «Орошенец», Советский район г. Волгограда;
- извлечение пылевидных частиц с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) и исследование дисперсного состава пыли;
- сравнительный анализ дисперсного состава пылевидных частиц, собранных с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в жилой зоне Среднеахтубинского района Волгоградской области с дисперсным составом пылевидных частиц в условно чистой зоне (контроль);
- выводы и рекомендации по результатам работы.

Анализ публикаций по изучению дисперсного состава пыли на листьях растений позволил сделать вывод о том, что в России большинство публикаций по этой теме посвящено исследованию пыли традиционным способом в городской среде: отбором проб атмосферного воздуха в жилых кварталах с последующим анализом пылевых частиц. Так, например, Н.В. Зайцева, И.В. Май, А.А. Макс, С.Ю. Загороднов оценивали экспозицию населения в зонах влияния выбросов промышленных стационарных источников предприятий машиностроительного и металлургического профиля при изучении дисперсного и компонентного состава твердой составляющей пыли. Ими установлено, что пылегазовые смеси содержат до 80 % фракций с размерами частиц менее 10 мкм (PM₁₀) и до 40 % фракций с размерами менее 2,5 мкм (PM_{2.5}). В составе пыли идентифицированы частицы наноразмерного диапазона. Основными химическими компонентами пыли являются железо, кремний, алюминий и их оксиды, однако в ряде пыли до 25 % по массе составляют марганец, хром, ванадий и другие токсичные металлы. Учет дисперсного состава пыли при оценке загрязнения позволяет более точно устанавливать зону влияния источников, корректно оценивать экспозицию населения с учетом гигиенических критериев PM₁₀ и PM_{2.5} [13].

К.С. Голохваст изучал нано- и микроразмерные частицы атмосферных взвесей и их экологический эффект в городах Дальнего Востока [14]. Несколько позже К.С. Голохваст, И.Л. Ревуцкая и другие исследовали распределение пылевидных частиц по семи классам в снеге г. Биробиджан и в заповедной зоне «Бастак». Ими показано, что в атмосферных взвешах г. Биробиджан в экологически значимых количествах (до 72,4 %) содержатся техногенные микрочастицы. Обнаружено влияние ТЭЦ и автотранспортных развязок на качественный состав атмосферных взвесей. Авторы отметили, что в воздухе заповедника «Бастак» также содержится значительное (до 66,3 %) количество частиц размером до 10 мкм. Анализ качественного состава атмосферных взвесей Биробиджана подтверждает его статус как города с выраженным уровнем микроразмерного загрязнения атмосферы. К.С. Голохваст, И.Л. Ревуцкая и др. отметили, что г. Биробиджан отрицательно влияет на состав атмосферной взвеси заповедника «Бастак» [15].

И.А. Просвирикова, Л.М. Шевчук представили результаты гигиенической оценки содержания мелкодисперсных твердых частиц в атмосферном воздухе на территории жилой застройки, расположенной в зоне влияния выбросов автотранспорта. Авторами выполнен анализ фракционного состава твердых частиц, проведена гигиеническая оценка степени загрязнения атмосферного воздуха и определены уровни риска для здоровья населения, обусловленные загрязнением атмосферного воздуха территорий жилой застройки мелкодисперсными частицами [16].

В.Н. Азаров, И.В. Стефаненко и другие авторы проводили мониторинг мелкодисперсной пыли городских воздушных магистралей вблизи автодорог. При помощи методики микроскопического анализа был определен дисперсный состав пылевых частиц, присутствующих на автомагистралях. Так, в общей пробе пылевых частиц, по мнению авторов, преобладает дорожная пыль мелких фракций (размер — менее 10 мкм), ее доля в общей пробе достигает 70 %. В.Н. Азаров, И.В. Стефаненко установили, что колебания дисперсного состава пыли значительно выше, чем погрешность методов измерений, поэтому необходимо рассматривать функции, описывающие дисперсный состав дорожной пыли в воздушной среде городов как случайные. Авторы получили характеристики дисперсного состава пыли в воздушной среде и определили среднее время пребывания фракционной концентрации выше заданного уровня, среднее число выходов фракционной концентрации в единицу времени за фиксированный уровень [17, 18].

Однако есть немного данных от российских исследователей, которые изучали пыль на листьях растений, но без анализа их фракционного состава.

Так, О.В. Чернышенко исследовала листья городских деревьев и кустарников (*Populus balsamifera*; *Populus nigra*; *Symphoricarpos albus*; *Sambucus nigra*) по интенсивности накопления на них пыли, но дисперсность пыли автором не рассматривалась [19]. Е.А. Агеева, М.Н. Казанцева производили оценку пылеудерживающей способности листьев деревьев и кустарников (*Sorbus sibirica*, *Cotoneaster melanocarpus* и др.) в г. Тюмени. Анализ полученных данных показал, что среднее количество пыли, осаждаемой листьями городских растений, существенно выше, чем в зеленой зоне города. Со стороны авторов дисперсность пыли не рассматривалась [20].

Л.И. Аткина, М.В. Игнатова изучали количество пыли, задержанной листьями на деревьях *Malus baccata* L., *Sorbus aucuparia* L., *Acer negundo* L., *Crataegus sanguinea* L. В городских посадках г. Екатеринбург, растущих вдоль магистрали, тем не менее диаметры пылевидных частиц ими также не изучались, на фракции пыль не разбивалась [21].

Что касается зарубежных ученых, то в этом направлении имеется достаточно большое количество работ, посвященных исследованию мелкодисперсной пыли на листьях растений в городской среде.

Так, A. Przybysz, A. Saebo, H. Hanslin проводили мониторинг накопления твердых частиц и микроэлементов на листовых пластинках растений вечнозеленых видов (*Taxus baccata* L., *Hedera helix* L. и *Pinus sylvestris* L.) в городской среде и в сельской местности с учетом количества осадков и времени. Наибольшее накопление загрязняющих веществ в воздухе авторы обнаружили в листе растений, защищенных от дождя; в местах, подверженных загрязнению, связанному с дорожным движением, а наименьшее накопление пыли было обнаружено в листьях растений сельской местности. Среди проанализированных видов наибольшее количество осаждаемых мелкодисперсных частиц и микроэлементов было у *P. Sylvestris*. Эти результаты показали, что при оценке общего влияния растительности на восстановление загрязнителей необходимо учитывать как динамику осаждения, так и вымывание листьев дождями в течение сезона [22].

Позже R. Popek, A. Lukowski, C. Bates провели ряд исследований в пяти польских городах по изучению фракций мелкодисперсной пыли, тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на листьях растений (*Tilia cordata* Mill). Авторы обнаружили, что сильные ветры уменьшали количество мелкодисперсной пыли на листьях, особенно мельчайших фракций, но никакой связи с осадками обнаружено ими не было [23].

G. Sgrigna, A. Saebo, S. Gawronski изучали мелкодисперсную пыль разных фракций: от 0,2 до 2,5

мкм и от 2,5 до 10 мкм на листьях растения *Quercus ilex*, в том числе и осаждение PM_{2.5}, PM₁₀ в четырех районах г. Терни (Италия). В данной работе были обнаружены изменения в осаждении мелкодисперсной пыли, которые коррелировали, по мнению авторов, «с расстоянием до основных дорог и положением по ветру относительно промышленной зоны» [24].

Y. Song, B. Maher, F. Li проводили исследование мелкодисперсной пыли на листьях деревьев пяти вечнозеленых растений в Пекине (Китай), изучая их морфологию, размер, элементный состав, массовую концентрацию [25].

J. Shi, G. Zhang, H. An изучали элементный состав, плотность и размерные доли мелкодисперсных частиц на поверхностях листьев 14 городских зеленых растений (*Salix matsudana*, *Euonymus japonicus*, *Magnolia denudata*, *Sophora japonica* и др.) от путепровода Сичжимэнь и Олимпийского лесопарка в Пекине [26].

L. Mo, Z. Ma, Y. Xu оценивали отложения пыли на листьях и в восковом слое 35 видов (11 кустарников, 24 дерева) в Пекине. Были выявлены различия в накоплении мелкодисперсной пыли между видами. Так, *Cephalotaxus sinensis*, *Euonymus japonicus*, *Broussonetia papyrifera*, *Koeleria paniculata* и *Quercus variabilis* были эффективными для захвата мелких частиц. Результаты этого исследования могут помочь отобрать виды для городских зеленых зон, цель которых состоит в улавливании загрязнителей воздуха и смягчении неблагоприятного воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека [27].

L. Lin, J. Yan, K. Ma представили новый подход к количественной характеристике твердых частиц, осажденных на листьях городских деревьев (*Salix matsudana*, *Ailanthus altissima*, *Fraxinus chinensis*), который заключается в точном определении количества, размеров, формы и пространственного распределения частиц с разными диаметрами на листьях [28].

S. Janhall провела аналитический обзор исследований, посвященных скорости осаждения мелкодисперсной пыли на листья городских растений, изучению плотности PM_{2.5} и PM₁₀, PM > 10 на листьях; связи между аэродинамическим сопротивлением и дисперсностью пылевидных частиц и др. и пришла к интересному выводу о том, что осаждение крупных частиц на листья растений более эффективно при высоких скоростях ветра. По ее мнению, городская растительность влияет на качество воздуха именно через воздействие процессов осаждения и рассеивания загрязняющих веществ [29].

Y. Xu, W. Xu, L. Mo занимались исследованием количественной оценки пылевидных частиц трех фракций: 0,2–2,5 мкм, 2,5–10 мкм, > 10 мкм, накопленных 17 видами городских растений в Пекине.

Авторы сделали вывод о том, что наибольшее накопление пыли по массе на листьях приходилось на долю частиц фракции: > 10 мкм, тогда как накопление фракций: 0,2–2,5 мкм и 2,5–10 мкм было меньше [30].

U. Weerakkody, J.W. Dover, P. Mitchell занимались также количественной оценкой пылевидных частиц на листьях растений зеленых стен в городе, где наибольшее количество частиц всех размеров было ими обнаружено на игловках листьев *Juniperus chinensis* L. Данное исследование подчеркнуло важность размера отдельных листьев при захвате мелкодисперсной пыли независимо от их изменяющейся микроморфологии [31].

S. Singh, P. Bhattacharya, N. Gupta изучали количественное отложение пыли на лиственной поверхности городских деревьев *Thevetia peruviana*, K. Schum в промышленных, жилых и других зонах г. Дели (Индия). Их эксперимент дал положительную оценку данным видам растений как толерантным биоиндикаторам загрязнений атмосферного воздуха [32].

A. Przybysz, G. Nersisyan, S. Gawronski выявляли возможности вечнозеленых хвойных растений (*Taxus baccata* L. и *Pinus nigra* Arn.), а также лиственных растений (*Carpinus betulus* L.) удалять мелкодисперсную пыль из атмосферного воздуха городской зелени в зимний период [33].

X. Sun, H. Li, X. Guo определяли диаметр пылевидных частиц и площади, которые они занимали на листьях растений (*Euonymus japonicus*, *Pyracantha fortuneana*, *Ligustrum vicaryi*, *Amygdalus triloba*, *Ligustrum sinense* и др.). По мнению авторов, структура поверхности листьев значительно повлияла на способность растений удерживать мелкодисперсную пыль: растения с толстым восковым слоем или большими и плотными устьицами, например *E. japonicus*, адсорбировали больше мелкодисперсной пыли. Это исследование обеспечивает научную основу для способности ландшафтных растений удерживать частицы разного диаметра [34].

Между тем, некоторые исследователи пыли на листьях городских растений подчеркивали факт того, что данный вид мониторинга может использоваться как альтернатива традиционному мониторингу загрязнения воздуха. Так, M. Zampieri, J. Sarkis, Pestana, C. Rafael, изучив пылевидные частицы на листьях растений в городской среде, сделали вывод о том, что, например, растение «*T. granulosa* может использоваться в качестве пассивного био-монитора и ценной альтернативы мониторингу загрязнения воздуха и пространственно-временной оценки мелкодисперсной пыли». Авторы изучали мелкодисперсную пыль в диапазоне < 2,5, 2,5–10 мкм и > 10 мкм на листьях растений, произрастающих в г. Сан-Паулу и Кубата (Бразилия) [35].

T. Zhang, Y. Bai, X. Hong измеряли количество осажденной мелкодисперсной пыли и тяжелых металлов на листьях растения *Euonymus japonicus* в г. Пекине во время восточно-азиатского муссона, отмечая, что растения могут эффективно использоваться в качестве биомониторов загрязнения окружающей среды [36].

L. Lin, G. Chen, J. Yan провели факторный анализ ландшафтных метрик пылевидных частиц, осажденных на поверхности листьев (*Ailanthus*, *Ash*, *Willow*), и пришли к выводу, что можно обеспечить высокий пространственный мониторинг пыли в городской среде с помощью таких индикаторов, как пылевидные частицы на листьях городских растений [37].

Однако приведенные исследования в основном направлены на изучение пылевидных частиц и способность листьев растений захватывать пылевидные частицы определенного диаметра с целью разработки рекомендаций для городских территорий по посадке городских растений для максимального улавливания мелкодисперсной пыли и очистки загрязненного воздуха, и лишь в некоторых работах [35–37] рассматривается идея мониторинга PM_{2.5} и PM₁₀ как альтернатива государственному экологическому мониторингу. Поэтому данное исследование направлено на позиционирование листьев растений как пассивных биомониторов качества окружающей среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Организация эксперимента проходила в три этапа. На первом этапе производился выбор территории исследования, были выбраны жилая и общественно-деловая зоны в Среднеахтубинском районе Волгоградской области в границах: ул. Дружбы, ул. Октябрьская, ул. Кузнецкая, ул. Степана Разина. Указанные зоны выбраны не случайно, они находятся рядом с производственной зоной, с предприятиями по производству керамзита, машиностроения и др. Из-за деятельности промышленных предприятий в прилегающей к ним жилой зоне население периодически жалуется на ухудшение экологической ситуации, при этом в общественно-деловой зоне находятся объекты социального назначения: школа-интернат, детский сад, больница. Материалом исследования в данном случае послужили листья абрикосовых деревьев (*Prúnus armeniáca*), которые произрастают на данных территориальных зонах. Это — массовый вид, встречающийся в г. Волгограде и Волгоградской области с большой частотой. Сбор материала проводился в конце июня 2018 г. после завершения интенсивного роста листьев. Образцы листьев отбирались на высоте

1,5–2 м кроны (высота слоя воздуха, вдыхаемого человеком). Листья были взяты в шести точках на различном расстоянии от производственной зоны: от 150 до 800 м, в разных сторонах света, с разной ветровой нагрузкой. При сборе листьев обращалось внимание на состояние листовой пластины: она не должна быть подвержена изменениям, например, иметь следы от насекомых или бактериальных некрозов либо другие повреждения. В каждой точке было сделано 10 проб. Каждая проба представляет собой листья с одного вида абрикосового дерева (*Prúnus armeniáca*). Листовые пластинки отбирались в 10-кратной повторности, использовали несколько абрикосовых деревьев (*Prúnus armeniáca*) (до 3 шт.) в каждой точке. Одновременно отбирались листья абрикосового дерева (*Prúnus armeniáca*) в условно чистой зоне (контроль) в СНТ «Орошенец» на берегу Варваровского водохранилища (Советский район г. Волгоград). Все собранные листья по каждой пробе помещали в бумажные пакеты. На всех пакетах подписывали дату и время отбора материала, затем их доставляли в лабораторию, избегая встряхивания. Пыль с листьев одной пробы смывалась в химический стакан с дистиллированной водой. Полученная суспензия отфильтровывалась через середину фильтра АФА-ВП и высушивалась при температуре не более 30–40 °С (естественная температура атмосферного воздуха летом в Волгограде и Волгоградской области). Высушенный фильтрат (пыль с листьев) размещали равномерно на предметное стекло, которое устанавливалось на оптический микроскоп. Каждая проба содержала смыв пыли с 10–15 листьев одного вида растения (*Prúnus armeniáca*). В каждой точке исследования было собрано не менее 1000 пылевидных частиц.

На втором этапе производилось исследование дисперсного состава пыли, собранной на листьях абрикосовых деревьев (*Prúnus armeniáca*) в жилой и общественно-деловых зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области и на листьях абрикосовых деревьев (*Prúnus armeniáca*) в условно чистой зоне (контроль) в СНТ «Орошенец» на берегу Варваровского водохранилища (Советский район г. Волгоград). Выполнение измерений пылевидных частиц, обработка пыли, исследование дисперсного состава пыли осуществлялись согласно п. 11–13 ГОСТ Р 56929-2016 с помощью компьютерной программы SPOTEXPLORER, позволяющей производить цифровую обработку черно-белых изображений в формате Windows Bitmap (.bmp) по объему пылевидной частицы, рассчитывался ее эквивалентный диаметр и определялось количество частиц различного размера. По окончании сканирования фотографии выявлялся дисперсный состав генеральной совокупности пыли. Результаты измерений оформ-

ляли в виде таблиц, на основе которых строились дифференциальные и интегральные кривые распределения массы частиц по размерам, откладывая по оси абсцисс значения (диаметр частиц), а по оси ординат — плотность распределения частиц соответствующего размера в процентах. Таким образом, определялся не только дисперсный состав генеральной совокупности пыли, но и ее мелкодисперсной составляющей по ГОСТ Р 56929-2016².

На третьем этапе производились сравнение и анализ дисперсионных составов пыли, полученных в результате отбора проб пылевидных частиц с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в жилой и общественно-деловой зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области, а также с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в условно чистой зоне (контроль) в СНТ «Орошонец» на берегу Варваровского водохранилища (Советский район г. Волгоград).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в жилой зоне (точки № 4, 5, 6), в том числе в зоне размещения объектов социального назначения (больница — точка № 1, детский сад — точка № 3, школа-интернат — № 2) в Среднеахтубинском районе Волгоградской области, ситуационная карта представлена на рис. 1.

Материалом для исследования выбраны листья абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*), которые

произрастают на территории жилой и общественно-деловой зон в точках № 1–6. Листовые пластинки собраны в сухую погоду в конце июня 2018 г. Образец листовой пластинки абрикосового дерева (*Prunus armeniaca*) отображен на рис. 2. Всего было собрано в шести точках 600 шт. листьев абрикосового дерева (*Prunus armeniaca*), по 100 шт. листовых пластинок в каждой точке.

На листовых пластинах абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) была обнаружена пыль. Пылевидные частицы на листьях абрикоса обыкновенного (*Prunus armeniaca*) изучены с помощью растрового сканирующего микроскопа Versa 3D и представлены на рис. 3. Отображенные на рис. 3 листовые пластинки (*Prunus armeniaca*), как пример, были собраны в точке № 3 (ул. Кавказская (1) в Среднеахтубинском районе Волгоградской области.

Первоначально были проведены исследования дисперсного состава пылевидных частиц на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) в условно чистой зоне (контроль) в СНТ «Орошонец» Советского района г. Волгограда, которые в дальнейшем сравнивались с данными из жилой и общественной зон.

Обнаружена пыль разных фракций: < 2,5 мкм; 2,5–5 мкм; 5–10 мкм; 1–20 мкм, пыль фракции 20–40 мкм и более не обнаружена. Из дисперсного состава пылевидных частиц в условно чистой зоне (контроль) для сравнения нами была выбрана мелкодисперсная пыль PM_{2.5} и PM₁₀, как пылевидные частицы, которые представляют наибольшую угрозу для здоровья человека. При этом распределение количества частиц по эквивалентным диаметрам $N(d_e)$, % по PM_{2.5} составляет не более 12,16 %, PM₁₀ около 18,73 %; распределение массы частиц

² ГОСТ Р 56929-2016. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха. М. : Стандартинформ, 2016. С. 8–12.

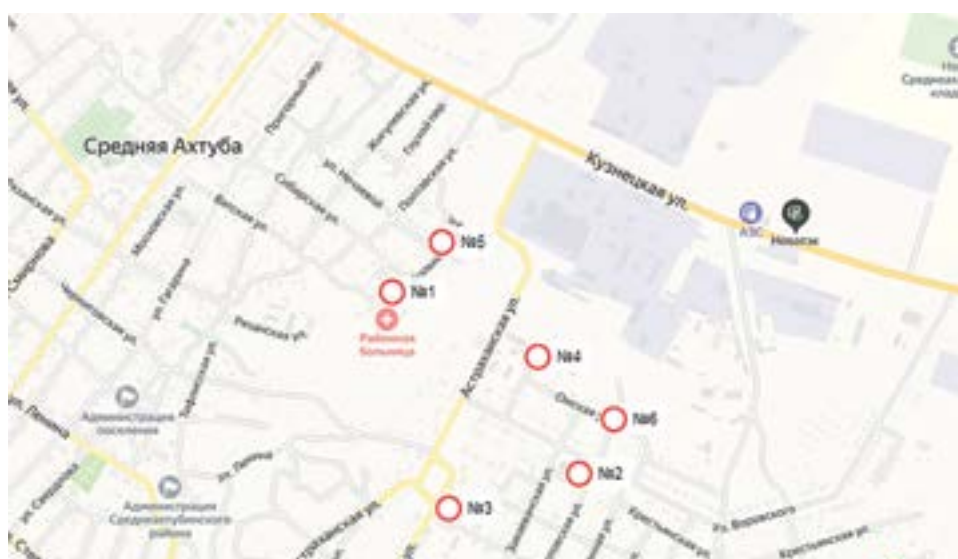


Рис. 1. Ситуационная карта жилой и общественно-деловой зон с точками отбора проб (Среднеахтубинский район, Волгоградская область)

Fig. 1. Planimetric map of residential and public areas having sampling points (Central Akhtuba district, Volgograd region)



Рис. 2. Лист абрикоса обыкновенного (*Prunus armeniaca*)

Fig. 2. Common apricot leaf (*Prunus armeniaca*)

по эквивалентным диаметрам $D(d_v)$, % по PM2.5 — 16,17 %, а по PM10 — 21,16 %.

Результаты исследований дисперсного состава пыли с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) из жилой и общественно-деловой зон Среднеахтубинского района Волгоградской области.

Точка № 1: для отбора проб была взята территория больницы по ул. Больничная (Среднеахтубинский район Волгоградской области). Это — западная точка, и расположена она ориентировочно в 660 м от производственной зоны. На рис. 4 представлено 10 интегральных кривых, построенных в вероятностно-логарифмической сетке на основе 10 проб (1а–10а) пылевидных частиц, отобранных с листовых пластинок (100 шт.) абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*), в которых содержалось не меньше 1000 шт. пылевидных частиц, изученных на оптическом микроскопе. По оси абсцисс x откладывается диаметр частиц (d_p , мкм), по оси ординат y — массовая доля частиц $D(d_p)$, %.

На рис. 5 представлены диаграммы распределения массы $D(d_p)$, % и количества $N(d_p)$, % пыле-

видных частиц по эквивалентным диаметрам. Из рис. 5 можно сделать вывод о том, что во всех пробах лидируют пылевидные частицы: PM10 как по числу, так и по массе, при этом по количественному содержанию $N(d_p)$, % PM10 достигает больше 80 %, это в 4,8 раза больше по сравнению с условно чистой зоной (контроль); по распределению массы частиц $D(d_p)$, % — в 3,8 раз больше по сравнению с условно чистой зоной (контроль). Данные по PM2.5: по количественному содержанию $N(d_p)$, % — в 3 раза превышают условно чистую зону (контроль), по распределению массы частиц по диаметрам $D(d_p)$, % — все значения находятся ниже условной нормы.

Точка № 2 представляет собой территорию вокруг школы-интерната (ул. Воровского, Среднеахтубинский район, Волгоградская область), расположена она на юго-востоке. Расстояние до производственной зоны ориентировочно 630 м. На рис. 6 представлено 10 интегральных кривых, построенных в вероятностно-логарифмической сетке на основе 10 проб (1 обр.–10 обр.) пылевидных частиц, отобранных с листовых пластинок (100 шт.) абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*).

На рис. 7 представлены диаграммы распределения массы $D(d_p)$, % и количества $N(d_p)$, % частиц по эквивалентным диаметрам. Из рис. 7 можно сделать вывод о том, что по количеству частиц на данной территории PM10, PM2.5 в 5 раз больше по сравнению с условно чистой зоной (контроль), а по массе преобладают более тяжелые фракции: 10–20 мкм, 20–40 мкм.

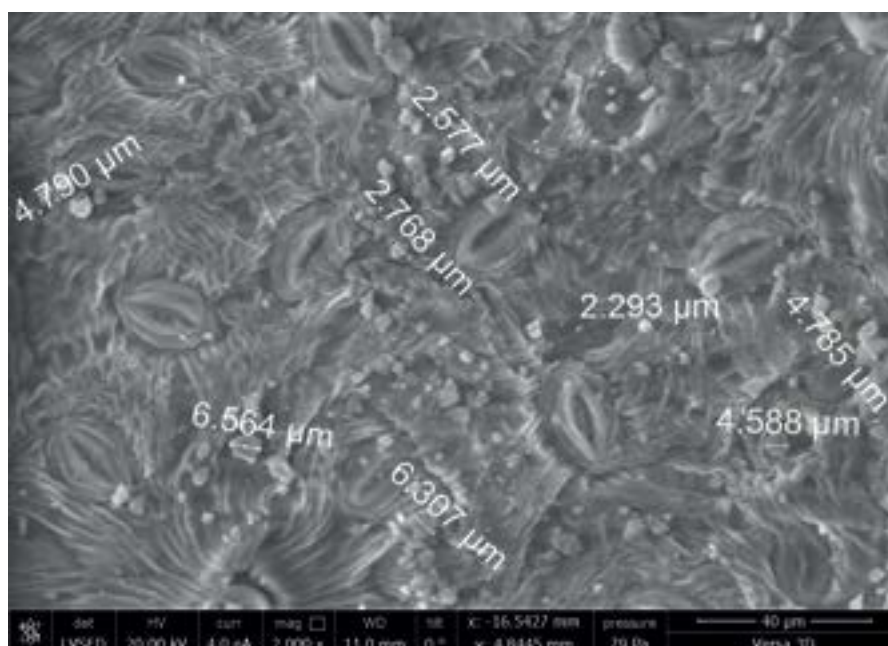


Рис. 3. Фото пылевидных частиц с обозначенными размерами на листовой пластинке абрикоса обыкновенного (*Prunus armeniaca*)

Fig. 3. Photo of dust particles with inscriptions of their sizes on the surface of a common apricot leaf (*Prunus armeniaca*)

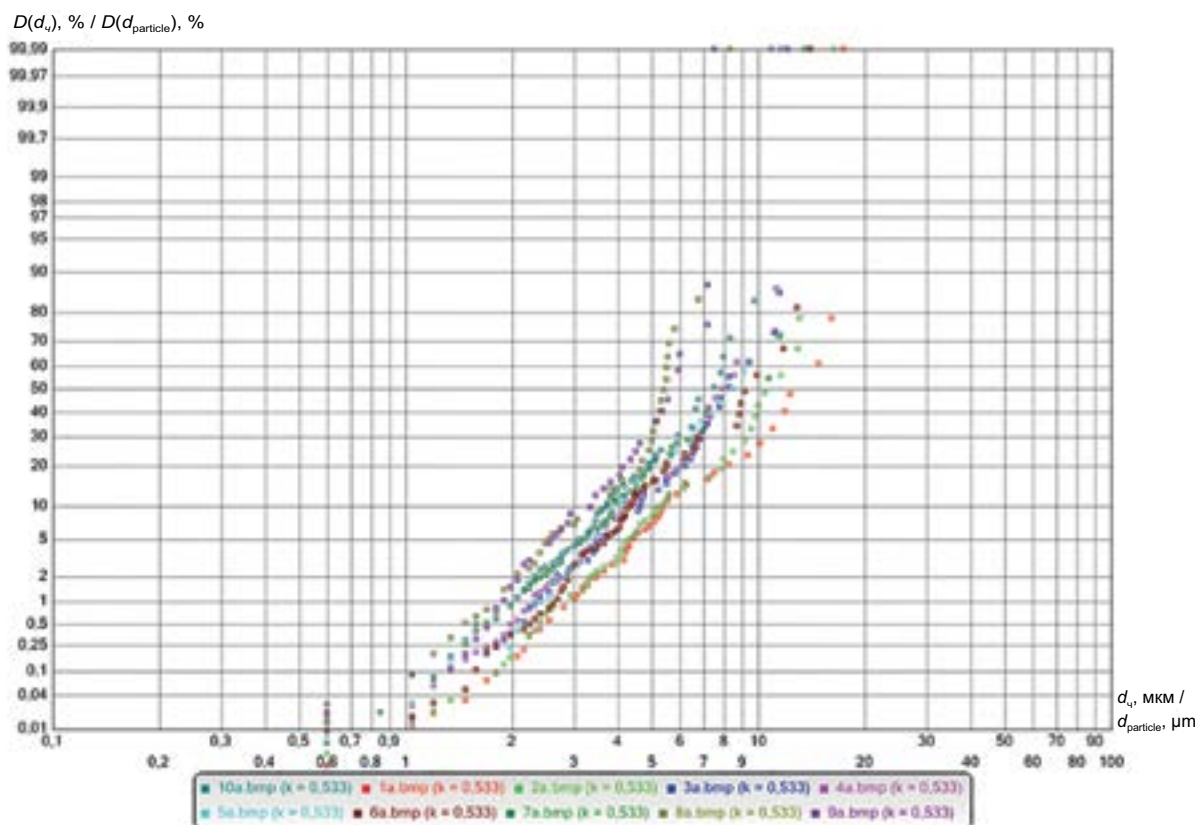


Рис. 4. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Больничная (Среднеахтубинский район, Волгоградская область) — точка № 1
Fig. 4. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Bolnichnaya street (Central Akhtubia district, Volgograd region). Point 1.

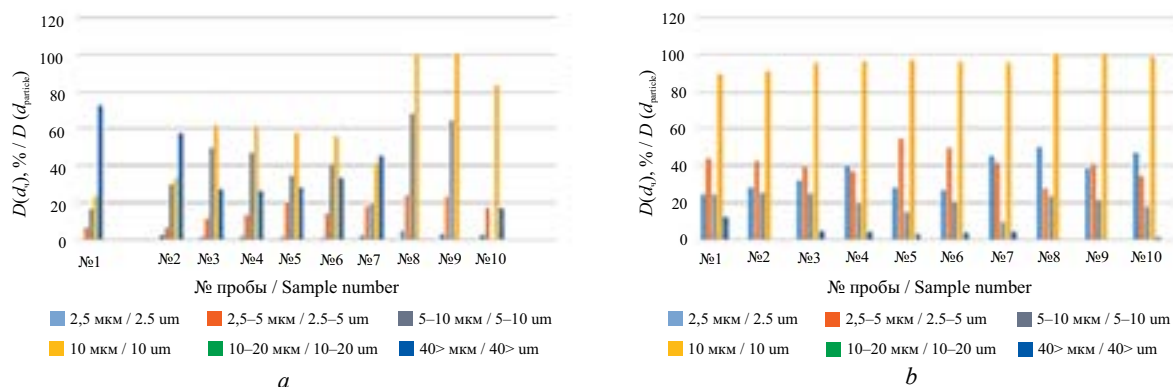


Рис. 5. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Больничная, (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка №1: *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_i)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_i)$, %
Fig. 5. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Bolnichnaya street (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 1: *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($d_{particle}$), %; *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($d_{particle}$), %

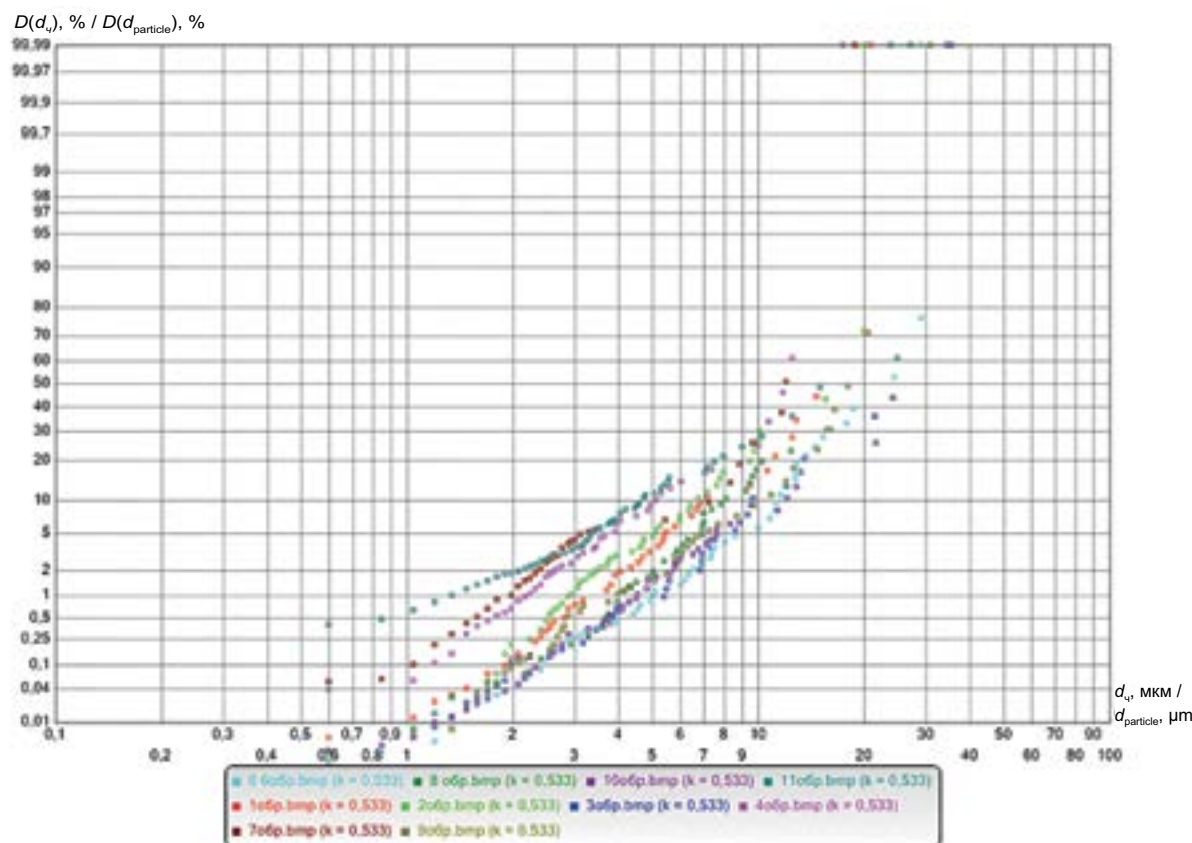


Рис. 6. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Воровского (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 2

Fig. 6. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Vorovskogo street (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 2.

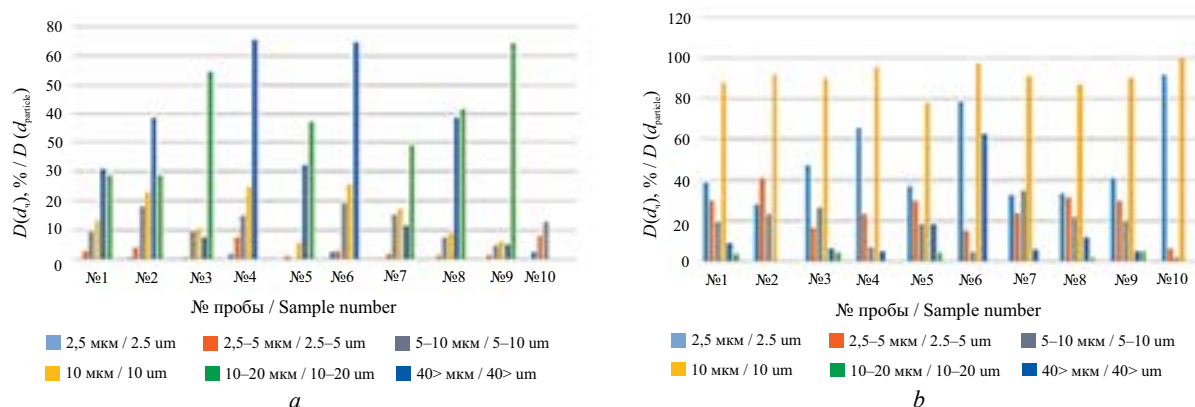


Рис. 7. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Воровского (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 2: *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_i)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_i)$, %

Fig. 7. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Vorovskogo street (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 2: *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($d_{particle}$), %; *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($d_{particle}$), %

Точка № 3 — это территория детского сада по ул. Кавказской (1) в Среднеахтубинском районе Волгоградской области. Данная точка расположена на юге исследуемой территории на расстоянии 800 м от производственной зоны. На рис. 8 представлено 10 интегральных кривых, построенных в вероятностно-логарифмической сетке на основе 10 проб (1–10) пылевидных частиц, отобранных с листовых пластинок (100 шт.) абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) на территории детского сада в Среднеахтубинском районе Волгоградской области.

На рис. 9 представлены диаграммы распределения массы частиц $D(d_q)$, количество частиц $N(d_q)$, % по эквивалентным диаметрам. Как видно из рис. 9, в точке № 3 по количеству частиц $N(d_q)$, % преобладают частицы PM2.5 и PM10, что в 5,3 раза больше значений в условно чистой зоне (контроль). По массе частиц $D(d_q)$, % также PM10 — в 2,8 раза больше значений в условно чистой зоне (контроль). Пылевидных частиц размером > 10–20 мкм и частиц размером 10–20 мкм диагностировано в общей сумме от 30–70 %, но не выше значений по сравнению с условно чистой зоной (контроль).

Точка № 4 представляет собой территорию около жилых домов в непосредственной близости от промышленных предприятий, в 300 м от основных источников выбросов. Данная точка расположена на севере исследуемой территории. На рис. 10 представлены 10 интегральных кривых, построенных в вероятностно-логарифмической сетке на основе 10 проб (1а–10а) пылевидных частиц, отобранных с листовых пластинок (100 шт.) абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) на территории вблизи малоэтажных застроек по ул. Кавказской (2) в Среднеахтубинском районе Волгоградской области.

На рис. 11 представлены диаграммы распределения массы частиц по диаметрам $D(d_q)$, % и количество частиц по диаметрам $N(d_q)$, %. Высокий процент распределения по количеству частиц занимают PM10, этих пылевидных частиц около 90 %, что в 4,5 раза больше по сравнению с условно чистой зоной (контроль), по массе в лидерах частицы фракции 10–20 мкм, что в 2,4 раза также больше по сравнению с условно чистой зоной (контроль).

Точка № 5 представляет жилую зону на северо-западе исследуемой территории по ул. Нечаевой в Среднеахтубинском районе Волгоградской области на расстоянии меньше 200 м от производственной зоны. На рис. 12 представлено 10 интегральных кривых, построенных в вероятностно-логарифмической сетке на основе 10 проб (1а–10а) пылевидных частиц, отобранных с листовых пластинок (100 шт.) абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) по ул. Нечаевой в Среднеахтубинском районе Волгоградской области.

На рис. 13 представлены диаграммы распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам $D(d_q)$, % и количеству частиц по диаметрам $N(d_q)$, %. Как видно из диаграмм, больше всего по количеству частиц PM10, их во всех 10 пробах одно и то же количество — около 90 %, что в 4,4 раза превышает значения в условно чистой зоне (контроль), а PM2.5 — в 4,2 раза больше, соответственно. По массе пылевидных частиц размерностью 10–20 мкм достигают до 75 %, частицы 20–40 мкм — до 70 %, в условно чистой зоне (контроль) фракции 20–40 мкм не обнаружено.

Точка № 6. Пробы пылевидных частиц с листьев абрикосовых деревьев проводились в северо-восточной части исследуемой территории по ул. Омской в Среднеахтубинском районе Волгоградской области, в 150 м от производственной зоны. На рис. 14 изображено 10 интегральных кривых.

На рис. 15 представлены диаграммы распределения массы частиц $D(d_q)$, % и количества частиц $N(d_q)$, % по эквивалентным диаметрам. Около 100 % PM10 по количеству частиц обнаружено практически во всех 10 пробах точки № 6, что 5,3 раз выше значений из условно чистой зоны (контроль), PM2.5 — 50–80 %, что в 5 раз превышает значения условно чистой зоны (контроль). В распределении массы частиц по диаметрам $D(d_q)$, % в 50 % проб также наблюдается PM10, которые по своим значениям превосходят условно чистую зону (контроль) в 4 раза, при этом лидирующую позицию в точке № 6 занимают пылевидные частицы больших диаметров: 20–40 мкм — 30–65 %, в условно чистой зоне их не обнаружено.

Из представленных рисунков можно сделать вывод, что наиболее безопасной территорией является точка № 2 (школа-интернат по ул. Воровского, Среднеахтубинский район Волгоградской области), на ней зафиксированы более тяжелые фракции размером: 10–20 мкм и 20–40 мкм, хотя по количеству в лидерах — PM10. Эта точка расположена на расстоянии больше 600 м от производственной зоны.

Точки № 1, 5, 6 находятся в непосредственной близости от промышленных предприятий на расстоянии около 200–250 м и представляют зоны экологического риска для проживания, поскольку зафиксировано больше всего мелкодисперсной пыли PM10 на листьях абрикосовых деревьев как по количеству, так и по их массе. Пылевидные частицы тяжелых фракций (20–40 мкм) обнаружены в точке № 6 в большом количестве, но не обнаружена фракция 20–40 мкм в точке № 5. Это свидетельствует о том, что на распределение пылевидных частиц оказывают большое влияние направление и скорость ветра.

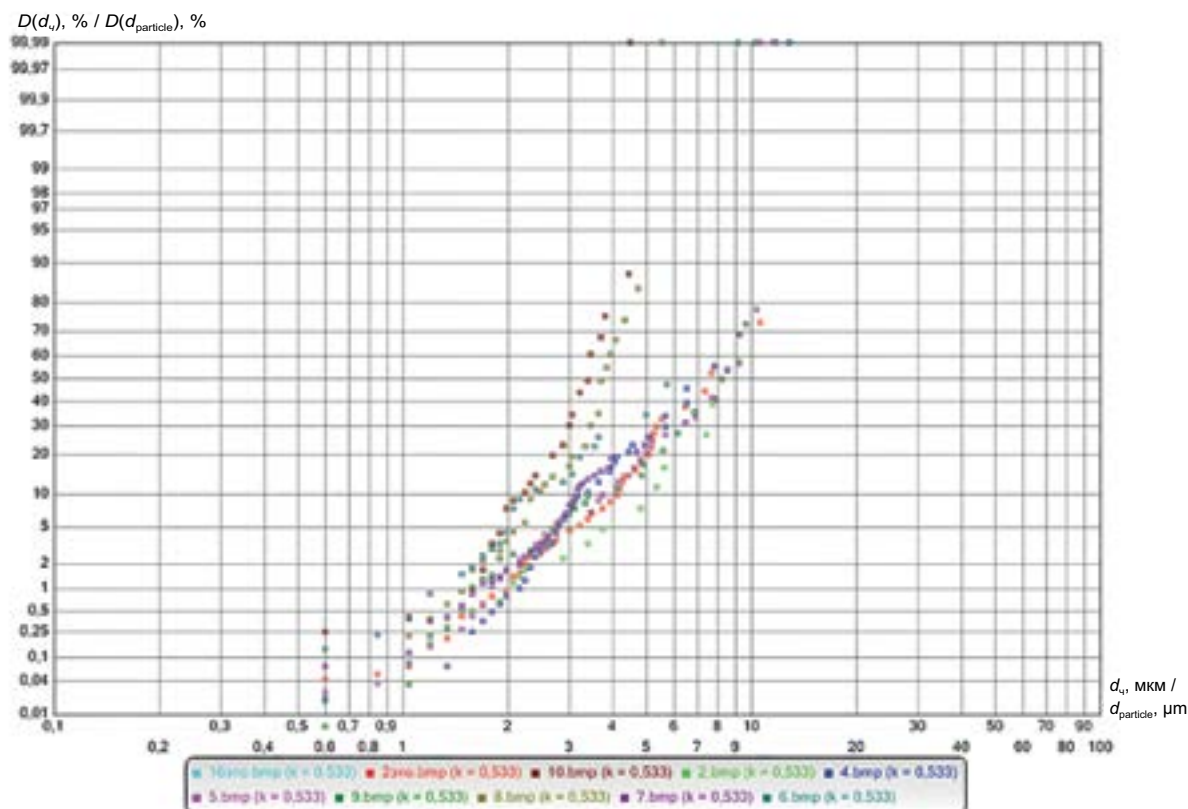


Рис. 8. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Кавказская (1) (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 3

Fig. 8. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Kavkazskaya street (1) (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 3

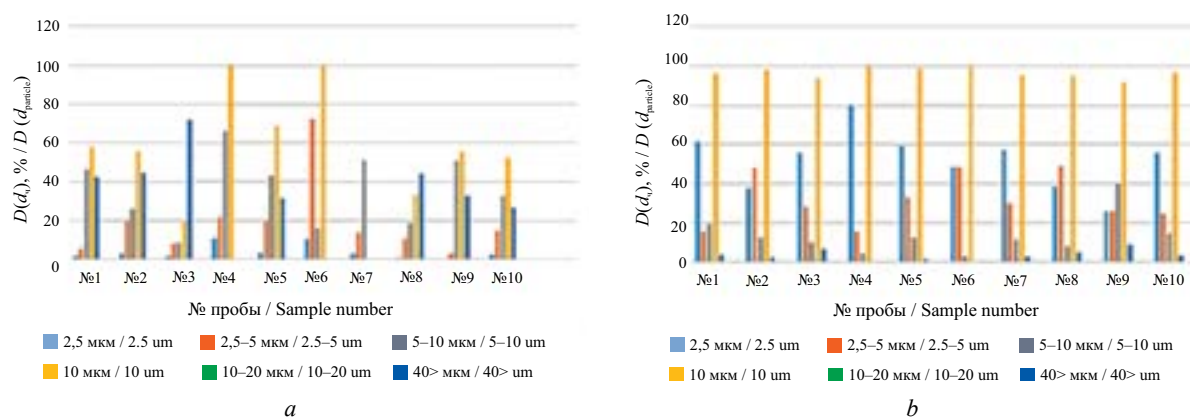


Рис. 9. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Кавказская (1) (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 3: *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_q)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_q)$, %

Fig. 9. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Kavkazskaya street (1) (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 3: *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($d_{particle}$), %; *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($d_{particle}$), %

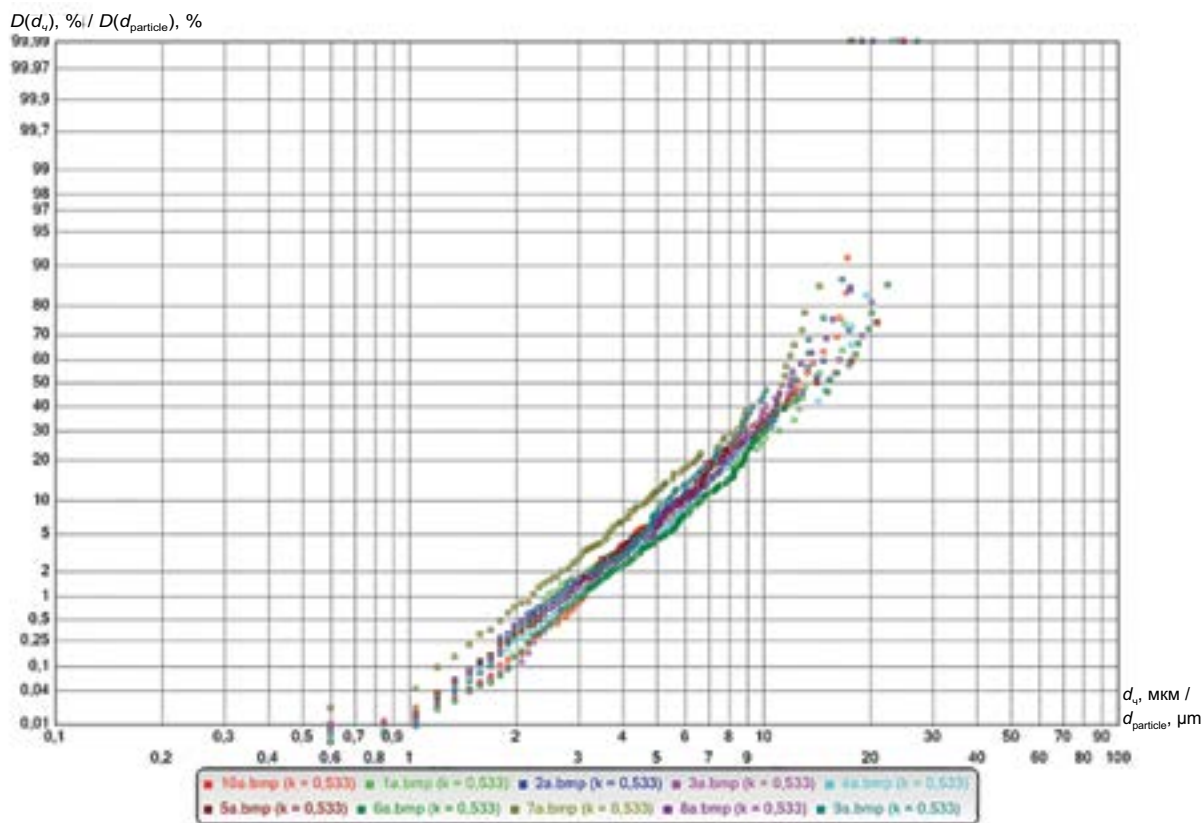


Рис. 10. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Кавказская (2) (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 4
Fig. 10. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Kavkazskaya street (2) (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 4

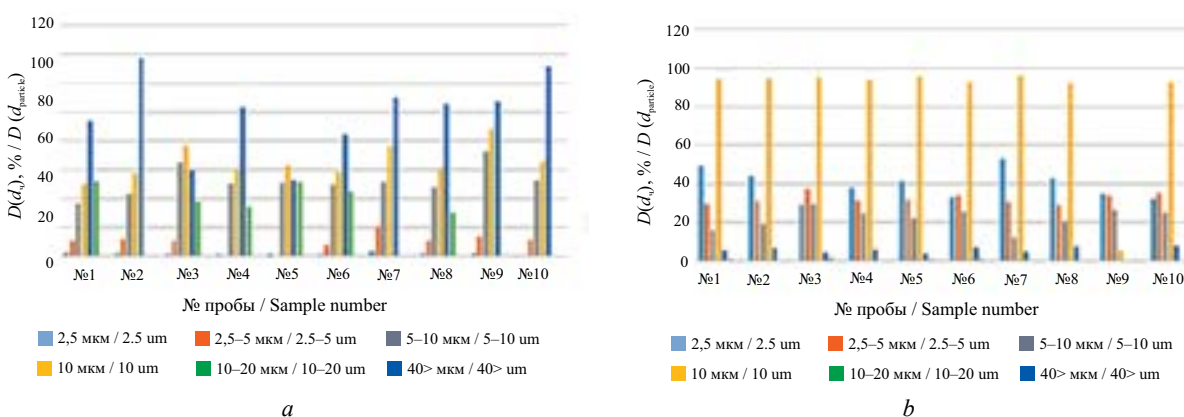


Рис. 11. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Кавказская (2) (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 4: *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_n)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_n)$, %
Fig. 11. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Kavkazskaya street (2) (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 4: *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($d_{particle}$), %; *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($d_{particle}$), %

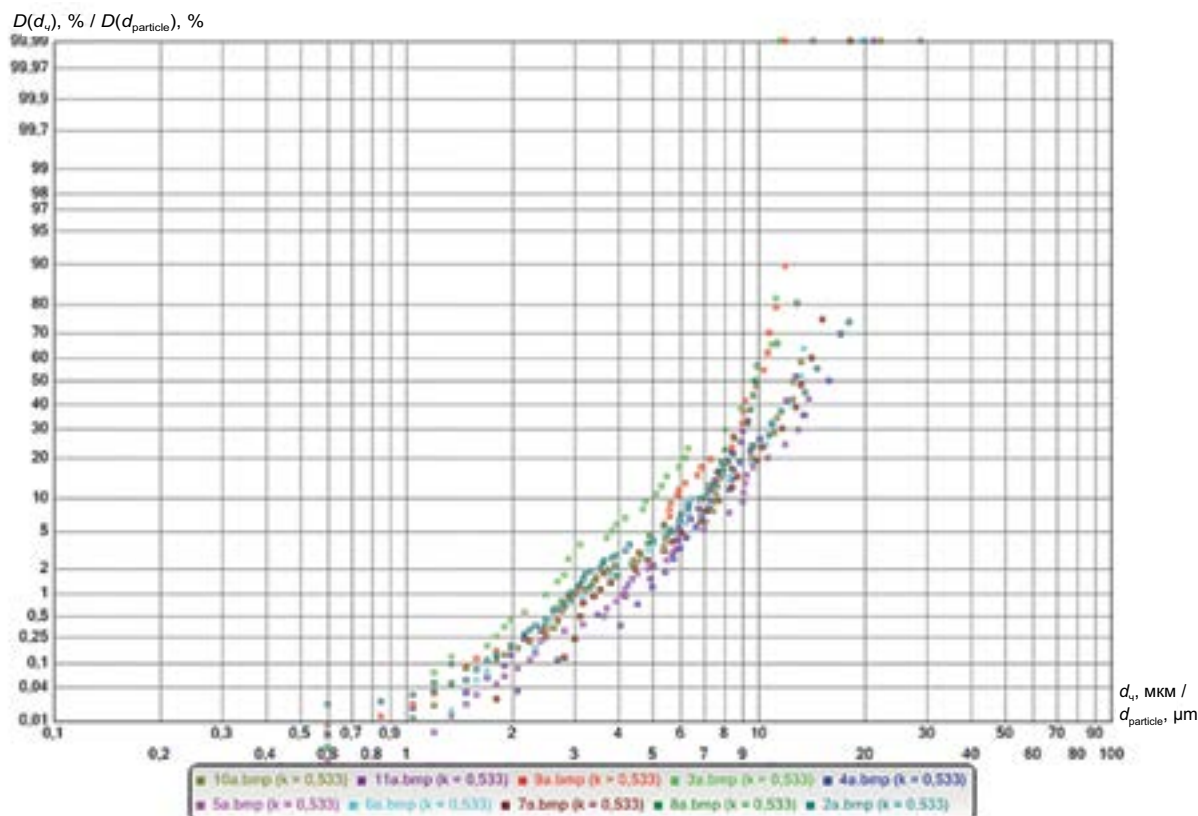


Рис. 12. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Нечаева (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 5
Fig. 12. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Nechayeva street (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 5

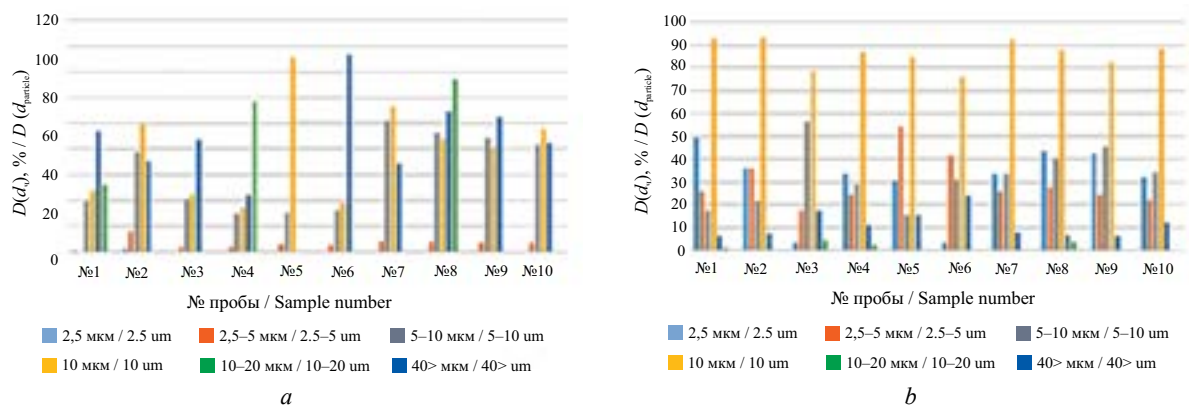


Рис. 13. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Нечаева, (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 5: *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_i)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_i)$, %
Fig. 13. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Nechayeva street (Central Akhtubia district, Volgograd region), Point 5: *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($D(d_i)$, %); *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($N(d_i)$, %)

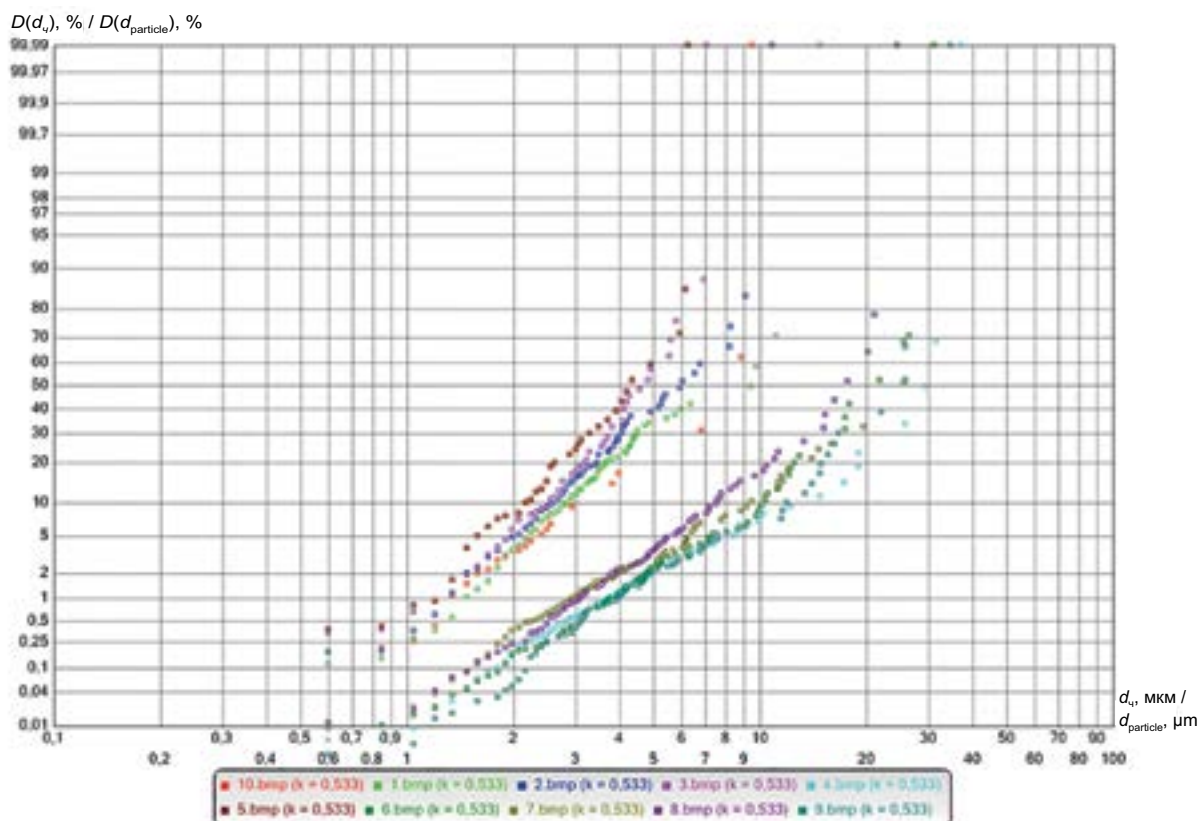


Рис. 14. Интегральные кривые распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной по ул. Омская (Среднеахтубинский район, Волгоградская область), точка № 6

Fig. 14. Integral curves of particle mass distribution over equivalent diameters in the probabilistic logarithmic grid for the dust sampled in Omskaya street (Central Akhtuba district, Volgograd region), Point 6

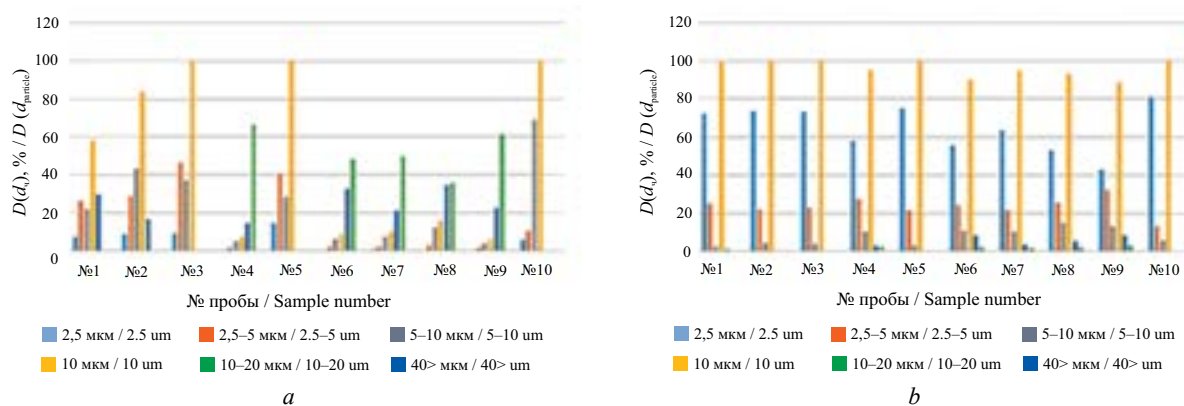


Рис. 15. Распределение массы и количества частиц по эквивалентным диаметрам, % для пыли, отобранной по ул. Омская (Среднеахтубинский район, Волгоградская область): *a* — диаграмма распределения массы частиц по диаметрам $D(d_i)$, %; *b* — диаграмма распределения количества частиц по диаметрам $N(d_i)$, %

Fig. 15. The distribution of mass and number of particles over equivalent diameters, in % for the dust sampled in Omskaya street (Central Akhtuba district, Volgograd region): *a* — the diagram of mass distribution of particles over D diameter ($d_{particle}$), %; *b* — the diagram of distribution of the number of particles over N diameters ($d_{particle}$), %

Стоит также обратить внимание на точку № 1, поскольку в ней расположен социальный объект — больничный комплекс, и в этой точке обнаружено больше всего мелкодисперсной пыли PM10 как по количеству, так и по массе.

Точка № 3 также попадает в зону экологического риска, хотя находится на расстоянии больше 800 м от производственной зоны, но в ней обнаружены PM10 в большом количестве как по массе, так и по количеству. В данной точке размещен детский сад.

Точка № 4 занимает пограничное положение по безопасности. С одной стороны в ней зафиксирован высокий процент мелкодисперсной пыли PM10 по количеству, однако по своей массе пылевидные частицы делят процентное соотношение между PM10 и фракцией 10–20 мкм, они в пробах в этой точке оказались практически в равных соотношениях.

Распределение пылевидных частиц в проанализированных точках обусловлено отсутствием осадков с апреля по июль 2018 г. на исследуемой территории, но зависело от скорости и направления ветра, и количества дней ветровых нагрузок, которые отображены на рис. 16.

Из диаграммы на рис. 16 видно, что преобладающие ветры — западный, восточный, юго-восточный не оказывали влияние на распространение пылевидных частиц, поскольку предприятие находится на исследуемой территории в северной части, а исследование жилой и общественно-деловой зон проходило южнее промзоны.

Однако северный ветер, который преобладал в течение 10 дней со скоростью 4,3 м/с, мог оказывать влияние на распространение мелкодисперсной пыли от производственной зоны на точку № 3, которую можно отнести в зону экологического риска, там находится детский сад, он как раз попал в зону влияния северного ветра, несмотря на то, что территория детского сада находится на расстоянии 800 м

от производственной зоны, возможны и другие обстоятельства. Известно, что мелкодисперсная пыль долго может витать в воздухе в течение 3–14 дней и более, и при отсутствии на нее влияния со стороны осадков, ветрами может переноситься на большие расстояния. Под действие северного ветра могли попасть территории точек № 4 и 5, в которых обнаружено больше всего по количеству PM10, до 90 %, а по массе преобладают тяжелые фракции > 10 мкм.

Северо-восточный ветер, который дул 7 дней со скоростью 6,5 м/с, оказывал влияние на точки № 6, 2. Северо-западный ветер пребывал всего 10 дней в течение трех месяцев в среднем со скоростью 5 м/с и мог также оказать влияние на точку № 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлен дисперсный состав пыли на листьях абрикосовых деревьев (*Prúnus armeniáca*) в жилой и общественно-деловой зонах Среднеахтубинского района Волгоградской области. Обнаружены мелкодисперсные частицы PM2.5, PM10, которые по своим значениям $N(d_q)$, %, $D(d_q)$, % значительно превышают данные по мелкодисперсной пыли в условно чистой зоне (контроль) в СХТ «Орошенец» (Советский район г. Волгоград), что создает определенные экологические риски для местных жителей. Превышение мелкодисперсной пыли на исследуемой территории может быть обусловлено разными факторами: как естественным, так и техногенным загрязнением окружающей среды. Поэтому в дальнейшем предстоит одновременно с исследованиями дисперсного состава пыли проводить ее химический анализ, чтобы оперативно обнаруживать источники загрязнения жилых зон в г. Волгограде и Волгоградской области и разрабатывать экологические мероприятия.

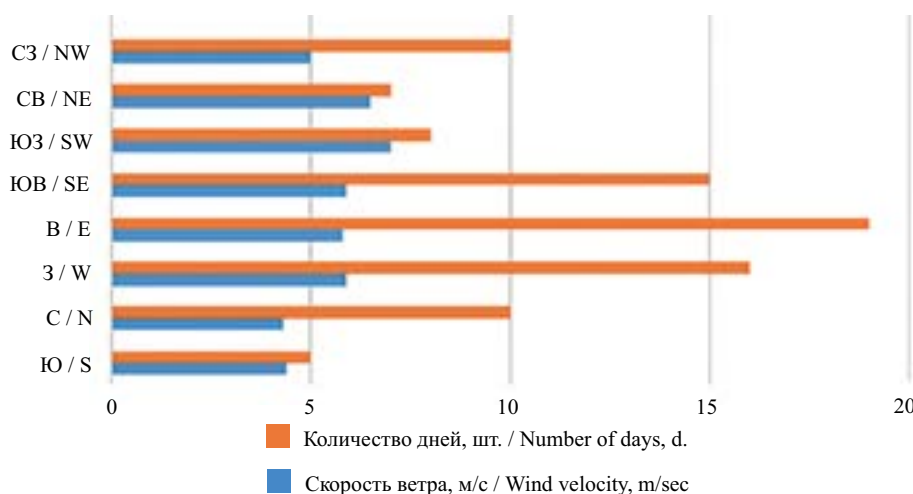


Рис. 16. Диаграмма направления ветра и его скорости к количеству дней (март–июнь 2018 г.)

Fig. 16. The diagram of wind direction and velocity in relation to the number of days (March–June, 2018)

ЛИТЕРАТУРА

1. Белова Т.И., Шкрабак В.С., Агаишков Е.М. Результаты лабораторного исследования дисперсного состава пыли пищевого концентрата красной свеклы в системе пылеудаления // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (49). С. 301–307.
2. Wu R., Zhong L., Huang X., Xu H., Liu S., Feng B. et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short-term mortality risks in Guangzhou, China: A time-series analysis (2006–2016) // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 645. Pp. 491–498. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.091
3. Cesar A.C.G., Nascimento L.F. Coarse particles and hospital admissions due to respiratory diseases in children. An ecological time series study // Sao Paulo Medical Journal. 2018. Vol. 136. Issue. 3. Pp. 245–250. DOI: 10.1590/1516-3180.2017.0362080218
4. Mokhtari M., Miri M., Mohammadi A., Khorsandi H., Hajizadeh Y., Abdollahnejad A. Assessment of Air Quality Index and Health Impact of PM₁₀, PM_{2.5} and SO₂ in Yazd, Iran // Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2015. Pp. 14–23. DOI: 10.1080 / 10807039.2018.1487277
5. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 // The Lancet. 2017. Vol. 389. Issue 10082. Pp. 1907–1918. DOI: 10.1016/s0140-6736(17)30505-6
6. Rumi R., Ghosh S., Padhy P. Indoor air pollution in rural north-east India: Elemental compositions, changes in haematological indices, oxidative stress and health risks // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 165. Pp. 393–403. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.014
7. Gao M., Beig G., Song S., Zhang H., Hu J., Ying Q. et al. The impact of power generation emissions on ambient PM_{2.5} pollution and human health in China and India // Environment International. 2018. Vol. 121. Pp. 250–259. DOI: 10.1016/j.envint.2018.09.015
8. Chan T.-C., Zhang Z., Lin B.-C., Lin C., Deng H.-B., Chuang Y.C. et al. Long-Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Chronic Kidney Disease: A Cohort Study // Environmental Health Perspectives. 2018. Vol. 126. Issue 10. P. 107002. DOI: 10.1289/EHP3304
9. Fagundes L.S., Fleck A.D.S., Zanchi A.C., Saldiva P.H.N., Rhoden C.R. Direct contact with particulate matter increases oxidative stress in different brain structures // Inhalation Toxicology. 2015. Vol. 27. Issue 10. Pp. 462–467. DOI: 10.3109/08958378.2015.1060278
10. Ljubimova J.Y., Braubach O., Patil R., Chiechi A., Tang J., Galstyan A. et al. Coarse particulate matter (PM_{2.5}-10) in Los Angeles Basin air induces expression of inflammation and cancer biomarkers in rat brains // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-018-23885-3
11. Andersen Z.J., Pedersen M., Weinmayr G., Stafoggia M., Galassi C., Jørgensen J.T. Long-term exposure to ambient air pollution and incidence of brain tumor: the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE) // Neuro-Oncology. 2018. Vol. 20. Issue 3. Pp. 420–432. DOI: 10.1093/neuonc/nox163
12. Dolci M., Favero C., Bollati V., Campo L., Cattaneo A., Bonzini M. Particulate matter exposure increases JC polyomavirus replication in the human host // Environmental Pollution. 2018. Vol. 241. Pp. 234–239. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.05.044
13. Зайцева Н.В., Май И.В., Макс А.А., Загороднов С.Ю. Анализ дисперсного и компонентного состава пыли для оценки экспозиции населения в зонах влияния выбросов промышленных стационарных источников // Гигиена и санитария. 2013. Т. 92. № 5. С. 19–23.
14. Голохваст К.С. Атмосферные взвеси городов Дальнего Востока России. Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2013. 178 с.
15. Голохваст К.С., Ревуцкая И.Л., Лонкина Е.С., Никитина А.В., Соломенник С.Ф., Романова Т.Ю. Нано- и микрогазовое загрязнение атмосферы заповедника «Бастак», вызванное техногенным влиянием г. Биробиджана // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2016. № 61. С. 36–41. DOI: 10.12737/21445
16. Просвирякова И.А., Шевчук Л.М. Гигиеническая оценка содержания твердых частиц PM₁₀ и PM_{2.5} в атмосферном воздухе и риска для здоровья жителей в зоне влияния выбросов стационарных источников промышленных предприятий // Анализ риска здоровью. 2018. № 2. С. 14–22. DOI: 10.21668/health.risk/2018.2.02
17. Azarov V.N., Stefanenko I.V., Karapuzova N.Yu., Nikolenko D.A. Monitoring of Fine Dust Pollution of Urban Air Nearby Highways // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2018. Vol. 12. Issue 8. P. 657. DOI: 10.15866/ireme.v12i8.13786
18. Чернышенко О.В. Пылефильтрующая способность древесных растений // Лесной вестник. 2012. № 3. С. 7–10.
19. Агеева Е.А., Казанцева М.Н. Оценка пылеудерживающей способности листьев деревьев и кустарников в насаждениях г. Тюмени // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 31. С. 88–91.
20. Аткина Л.И., Игнатова М.В. Особенности пылеудерживающей способности листьев *Malus baccata* L., *Sorbus aucuparia* L., *Acer negundo* L., *Crataegus sanguinea* L. в городских посадках Екатеринбурга // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 4 (51). С. 79–82.

21. Przybysz A., Sæbø A., Hanslin H.M., Gawroński S.W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 481. Pp. 360–369. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.072
22. Popek R., Łukowski A., Bates C., Oleksyn J. Accumulation of particulate matter, heavy metals, and polycyclic aromatic hydrocarbons on the leaves of *Tilia cordata* Mill in five Polish cities with different levels of air pollution // *International Journal of Phytoremediation*. 2017. Vol. 19. Issue 12. Pp. 1134–1141. DOI: 10.1080/15226514.2017.1328394
23. Sgrigna G., Sæbø A., Gawronski S., Popek R., Calfapietra C. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy // *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 197. Pp. 187–194. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.030
24. Song Y., Maher B.A., Li F., Wang X., Sun X., Zhang H. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution // *Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 105. Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.032
25. Shi J., Zhang G., An H., Yin W., Xia X. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China // *Atmospheric Pollution Research*. 2017. Vol. 8. Issue 5. Pp. 836–842. DOI: 10.1016/j.apr.2017.01.011
26. Mo L., Ma Z., Xu Y., Sun F., Lun X., Liu X. Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China // *Plos One*. 2015. Vol. 10. Issue 10. Pp. 8–18. DOI: 10.1371/journal.pone.0140664
27. Lin L., Yan J., Ma K., Zhou W., Chen G., Tang R. Characterization of particulate matter deposited on urban tree foliage: A landscape analysis approach // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 171. Pp. 59–69. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.09.012
28. Janhall S. Review on urban vegetation and particle air pollution — Deposition and dispersion // *Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 105. Pp. 130–137. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.052
29. Xu Y., Xu W., Mo L., Heal M.R., Xu X., Yu X. Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Issue 13. Pp. 12545–12556. DOI: 10.1007/s11356-018-1478-4
30. Weerakkody U., Dover J.W., Mitchell P., Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 635. Pp. 1012–1024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.106
31. Singh S., Bhattacharya P., Gupta N. Dust particles characterization and innate resistance for *Thevetia peruviana* in different land-use pattern of urban area // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 15. Issue 5. Pp. 1061–1072. DOI: 10.1007/s13762-017-1461-5
32. Przybysz A., Nersisyan G., Gawronski S. Removal of particulate matter and trace elements from ambient air by urban greenery in the winter season // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. Issue 1. Pp. 473–482. DOI: 10.1007/s11356-018-3628-0
33. Sun X., Li H., Guo X., Sun Y., Li S. Capacity of six shrub species to retain atmospheric particulates with different diameters // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Issue 3. Pp. 2643–2650. DOI: 10.1007/s11356-017-0549-2
34. Zampieri M.C.T., Sarkis J.E.S., Pestana R.C.B., Armando R. Tavares, Melo-de-Pinna G.F.A. Characterization of *Tibouchina granulosa* (Desr.) Cong. (Melastomataceae) as a biomonitor of air pollution and quantification of particulate matter adsorbed by leaves // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61. Pp. 316–327. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.050
35. Zhang T., Bai Y., Hong X., Sun L., Liu Y. Particulate matter and heavy metal deposition on the leaves of *Euonymus japonicus* during the East Asian monsoon in Beijing, China // *Plos One*. 2017. Vol. 12. Issue 6. P. e0179840. DOI: 10.1371/journal.pone.0179840
36. Lin L., Chen G., Yan J., Tang R., Yuan X., Yin Z., Zhang R. A factor analysis of landscape metrics of particles deposited on leaf surface // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Issue 28. Pp. 28391–28402. DOI: 10.1007/s11356-018-2804-6

Поступила в редакцию 29 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Ирина Юрьевна Глинянова — кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве Института архитектуры и строительства (ИАиС); Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 298099, Scopus: 57204780096, ORCID: 0000-0003-1388-1233; ecoris@yandex.ru;

Валерий Николаевич Азаров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве Института архитектуры и строительства (ИАиС); Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297; azarovpubl@mail.ru.

REFERENCES

1. Belova T.I., Shkrabak V.S., Agashkov E.M. The results of a laboratory study of the dispersed dust composition of red beet food concentrate in a dust extraction system. *News of St. Petersburg State Agrarian University*. 2017; 4(49):301-307. (rus.).
2. Wu R., Zhong L., Huang X., Xu H., Liu S., Feng B. et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short-term mortality risks in Guangzhou, China: A time-series analysis (2006-2016). *Science of The Total Environment*. 2018; 645:491-498. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.091
3. Cesar A.C.G., Nascimento L.F. Coarse particles and hospital admissions due to respiratory diseases in children. An ecological time series study. *Sao Paulo Medical Journal*. 2018; 136(3):245-250. DOI: 10.1590/1516-3180.2017.0362080218
4. Mokhtari M., Miri M., Mohammadi A., Khorasandi H., Hajizadeh Y., Abdollahnejad A. Assessment of Air Quality Index and Health Impact of PM10, PM2.5 and SO2 in Yazd, Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2015; 14-23. DOI: 10.1080 / 10807039.2018.1487277
5. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*. 2017; 389(10082):1907-1918. DOI: 10.1016/s0140-6736(17)30505-6
6. Rumi R., Ghosh S., Padhy P. Indoor air pollution in rural north-east India: Elemental compositions, changes in haematological indices, oxidative stress and health risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018; 165:393-403. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.014
7. Gao M., Beig G., Song S., Zhang H., Hu J., Ying Q. et al. The impact of power generation emissions on ambient PM2.5 pollution and human health in China and India. *Environment International*. 2018; 121:250-259. DOI: 10.1016/j.envint.2018.09.015
8. Chan T.-C., Zhang Z., Lin B.-C., Lin C., Deng H.-B., Chuang Y.C. et al. Long-Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Chronic Kidney Disease: A Cohort Study. *Environmental Health Perspectives*. 2018; 126(10):107002. DOI: 10.1289/EHP3304
9. Fagundes L.S., Fleck A.D.S., Zanchi A.C., Saldiva P.H.N., Rhoden C.R. Direct contact with particulate matter increases oxidative stress in different brain structures. *Inhalation Toxicology*. 2015; 27(10):462-467. DOI: 10.3109/08958378.2015.1060278
10. Ljubimova J.Y., Braubach O., Patil R., Chiechi A., Tang J., Galstyan A. et al. Coarse particulate matter (PM2.5-10) in Los Angeles Basin air induces expression of inflammation and cancer biomarkers in rat brains. *Scientific Reports*. 2018; 8(1):1-11. DOI: 10.1038/s41598-018-23885-3
11. Andersen Z.J., Pedersen M., Weinmayr G., Stafoggia M., Galassi C., Jørgensen J.T. Long-term exposure to ambient air pollution and incidence of brain tumor: the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Neuro-Oncology*. 2018; 20(3):420-432. DOI: 10.1093/neuonc/nox163
12. Dolci M., Favero C., Bollati V., Campo L., Cattaneo A., Bonzini M. Particulate matter exposure increases JC polyomavirus replication in the human host. *Environmental Pollution*. 2018; 241:234-239. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.05.044
13. Zaytseva N.V., May I.V., Maks A.A., Zagorodnov S.Yu. Analysis of the dispersion and component composition of the dust for the assessment of the exposure to the population in the areas of influence of industrial emissions of stationary sources. *Hygiene and Sanitation*. 2013; 92(5):19-23. (rus.).
14. Golokhvast K.S. *Atmospheric suspensions of the cities of the Russian Far East*. Vladivostok, FEPU Publishing House, 2013; 178. (rus.).
15. Golokhvast K.S., Revutskaya I.L., Lonkina E.S., Nikitina A.V., Solomennik S.F., Romanova T.Yu. Nano- and microdimensional pollution of the atmosphere of the reserve "BASTAK" caused by technogenic impact of Birobidzhan city. *Bulletin of Physiology and Respiratory Pathology*. 2016; 61:36-41. DOI: 10.12737/21445 (rus.).
16. Prosviryakova I.A., Shevchuk L.M. Hygienic assessment of PM10 and PM2.5 contents in the atmosphere and population health risk in zones influenced by emissions from stationary sources located at industrial enterprises. *Health Risk Analysis*. 2018; (2):14-22. DOI: 10.21668/health.risk/2018.2.02.eng (rus.).
17. Azarov V.N., Stefanenko I.V., Karapuzova N.Yu., Nikolenko D.A. Monitoring of Fine Dust Pollution of Urban Air Nearby Highways. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2018; 12(8):657. DOI: 10.15866/ireme.v12i8.13786
18. Chernyshenko O.V. Dust-filtering ability of woody plants. *Forest Bulletin*. 2012; 3:7-10. (rus.).
19. Ageeva E.A., Kazantseva M.N. Evaluation of the dust holding capacity of leaves of trees and shrubs in the stands of the city of Tyumen. *Actual problems of the forest complex*. 2012; 31:88-91. (rus.).
20. Atkina L.I., Ignatova M.V. Features of the dust-holding ability of the leaves of *Malus baccata* L., *Sorbus aucuparia* L., *Acer negundo* L., *Crataegus sanguinea* L. in urban plantings of Yekaterinburg. *Forests of Russia and the economy in them*. 2014; 4(51):79-82. (rus.).
21. Przybysz A., Sæbø A., Hanslin H.M., Gawroński S.W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*. 2014; 481:360-369. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.072

22. Popek R., Lukowski A., Bates C., Oleksyn J. Accumulation of particulate matter, heavy metals, and polycyclic aromatic hydrocarbons on the leaves of *Tilia cordata* Mill. in five Polish cities with different levels of air pollution. *International Journal of Phytoremediation*. 2017; 19(12):1134-1141. DOI: 10.1080/15226514.2017.1328394
23. Sgrigna G., Sæbø A., Gawronski S., Popek R., Calfapietra C. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy. *Environmental Pollution*. 2015; 197:187-194. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.030
24. Song Y., Maher B.A., Li F., Wang X., Sun X., Zhang H. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. *Atmospheric Environment*. 2015; 105:53-60. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.032
25. Shi J., Zhang G., An H., Yin W., Xia X. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*. 2017; 8(5):836-842. DOI: 10.1016/j.apr.2017.01.011
26. Mo L., Ma Z., Xu Y., Sun F., Lun X., Liu X. Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China. *Plos One*. 2015; 10(10):8-18. DOI: 10.1371/journal.pone.0140664
27. Lin L., Yan J., Ma K., Zhou W., Chen G., Tang R. Characterization of particulate matter deposited on urban tree foliage: A landscape analysis approach. *Atmospheric Environment*. 2017; 171:59-69. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.09.012
28. Janhall S. Review on urban vegetation and particle air pollution — Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*. 2015; 105:130-137. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.052
29. Xu Y., Xu W., Mo L., Heal M.R., Xu X., Yu X. Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(13):12545-12556. DOI: 10.1007/s11356-018-1478-4
30. Weerakkody U., Dover J.W., Mitchell P., Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. *Science of the Total Environment*. 2018; 635:1012-1024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.106
31. Singh S., Bhattacharya P., Gupta N. Dust particles characterization and innate resistance for *Thevetia peruviana* in different land-use pattern of urban area. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2018; 15(5):1061-1072. DOI: 10.1007/s13762-017-1461-5
32. Przybysz A., Nersisyan G., Gawronski S. Removal of particulate matter and trace elements from ambient air by urban greenery in the winter season. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; 26(1):473-482. DOI: 10.1007/s11356-018-3628-0
33. Sun X., Li H., Guo X., Sun Y., Li S. Capacity of six shrub species to retain atmospheric particulates with different diameters. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(3):2643-2650. DOI: 10.1007/s11356-017-0549-2
34. Zampieri M.C.T., Sarkis J.E.S., Pestana R.C.B., Armando R. Tavares, Melo-de-Pinna G.F.A. Characterization of *Tibouchina granulosa* (Desr.) Cong. (Melastomataceae) as a biomonitor of air pollution and quantification of particulate matter adsorbed by leaves. *Ecological Engineering*. 2013; 61:316-327. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.050
35. Zhang T., Bai Y., Hong X., Sun L., Liu Y. Particulate matter and heavy metal deposition on the leaves of *Euonymus japonicus* during the East Asian monsoon in Beijing, China. *Plos One*. 2017; 12(6):e0179840. DOI: 10.1371/journal.pone.0179840
36. Lin L., Chen G., Yan J., Tang R., Yuan X., Yin Z., Zhang R. A factor analysis of landscape metrics of particles deposited on leaf surface. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(28):28391-28402. DOI: 10.1007/s11356-018-2804-6

Received January 29, 2020.

Adopted in a revised form on February 20, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

BIONOTES: **Irina Yu. Glinyanova** — Ph.D, Associate Professor of the Department of Life Safety in Construction and Urban Management of Institute of Architecture and Construction (IAaC); **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RISC: 298099, Scopus: 57204780096, ORCID: 0000-0003-1388-1233; ecoris@yandex.ru;

Valery N. Azarov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Management of Institute of Architecture and Construction (IAaC); **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RISC: 148320, Scopus: 7004170297; azarovpubl@mail.ru.

Очистка промывных вод станций обезжелезивания подземных вод коагулированием в присутствии фосфатов

Б.Н. Житенев¹, Л.Е. Йорданова²

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

² Независимый исследователь; Республика Беларусь, г. Брест

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ современного состояния водных ресурсов свидетельствует об актуальности и целесообразности создания высокоэффективных методов обработки промывных вод станций обезжелезивания подземных вод. В соответствии с действующими техническими нормативно-правовыми актами промывные воды должны использоваться повторно. Как показал опыт эксплуатации станций обезжелезивания, сооружения по обработке промывных вод работают неэффективно. Предприятия водопроводно-канализационного хозяйства отказываются от применения сооружений по обработке промывных вод и их повторного использования. Высококонцентрированные железосодержащие промывные воды сбрасываются в канализацию либо в прилегающие водоемы или на рельеф местности, что приводит к нерациональному использованию высококачественной подземной воды и загрязнению окружающей среды соединениями железа.

Материалы и методы. Использованы физико-химические, технологические, математические, рентгено- и микроскопические методы.

Результаты. Представлены результаты экспериментальных исследований и статической обработки данных качественного и количественного состава промывных вод станций обезжелезивания. Изучена химическая природа составляющих веществ и характер формирования промывных вод в процессе обезжелезивания подземных вод. Выявлено, что при совместной обработке промывных вод станций обезжелезивания реагентом фосфатом натрия Na_3PO_4 и коагулянтом сульфатом алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ интенсифицируется процесс осаждения соединений железа — образуются коллоидные частицы FePO_4 , обладающие очень низкой растворимостью, которые эффективно удаляются коагуляцией. Подтверждено, что анионы H_2PO_4^- и PO_4^{3-} , образующиеся при гидролизе фосфата натрия Na_3PO_4 , способствуют снижению электрокинетического заряда коллоидной частицы гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, а высокая степень очистки до 99,0–99,9 % достигается путем фиксации соединений железа на поверхности коллоидной частицы гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Выводы. Разработана математико-статистическая модель процесса очистки промывных вод станций обезжелезивания коагулированием в присутствии фосфатов, описывающая зависимость остаточной концентрации железа от дозы фосфата натрия Na_3PO_4 , дозы сульфата алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и продолжительности отстаивания. Создана технология очистки промывных вод станций обезжелезивания коагулированием в присутствии фосфатов, отличающаяся тем, что включает сооружения реагентного хозяйства фосфата натрия и коагулянта сульфата алюминия, фильтр доочистки, сооружения механического обезвоживания осадка. Применение технологии позволяет снизить содержание железа до 0,05–0,20 мг/л и повторно использовать промывные воды для хозяйственно-питьевых целей или собственных нужд станций обезжелезивания, предотвращая загрязнение водных источников соединениями железа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промывные воды, станция обезжелезивания, коагулянт, фосфаты, технология, обезвоживание, осадок, осаждение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Житенев Б.Н., Йорданова Л.Е. Очистка промывных вод станций обезжелезивания подземных вод коагулированием в присутствии фосфатов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 553–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.553-568

Backwash water treatment by coagulation in the presence of phosphates at underground water iron removal stations

Barys N. Zhytsianiou, Lyudmila E. Yordanova

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

² Independent researcher; Brest, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The analysis of the present-day condition of water resources has proven the relevance and expediency of developing highly effective backwash water treatment methods to be used at iron removal stations designated for groundwater treatment. In accordance with effective technical regulations, backwash water must be reused. The operation of iron removal stations has proven the inefficiency of backwash water treatment facilities. Water and wastewater treatment companies stop using backwash water treatment facilities and refrain from reusing backwash water. Highly concentrated

iron-bearing backwash water is discharged into sewage networks, nearby water bodies or onto the terrain, which means irrational use of high-quality groundwater and environmental pollution with iron compounds.

Materials and methods. The results of experimental research efforts and statistical processing of data on the qualitative and quantitative composition of backwash water at iron removal stations are presented. The chemical nature of the components and the principle underlying the formation of the backwash water composition in the process of groundwater deferrization have been studied. It's been identified that if backwash water supplied by iron removal stations is treated by sodium phosphate reagent Na_3PO_4 and aluminum sulphate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ as a coagulant, precipitation of iron compounds intensifies, as colloidal particles FePO_4 are formed. They have very low solubility, and they are effectively removed by coagulation. It has been theoretically proven and experimentally confirmed that anions H_2PO_4^- and PO_4^{3-} formed in the process of hydrolysis of sodium phosphate Na_3PO_4 help to reduce the electrokinetic charge of the colloidal particle of iron hydroxide $\text{Fe}(\text{OH})_3$, and high purification efficiency reaching 99.0–99.9 % is attained by attaching iron compounds to the surface of the colloidal particle of aluminum hydroxide $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Conclusions. The co-authors have developed a math-and-stats model simulating the backwash water treatment process that employs coagulation in the presence of phosphates. It describes the dependence between the concentration of residual iron, doses of sodium phosphate Na_3PO_4 , aluminum sulphate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and the settling time. A backwash water treatment technology has been developed. It employs coagulation in the presence of phosphates, and it is designated for use at iron removal stations. This technology comprises a chemical plant for sodium phosphate and aluminum sulphate used as a coagulant, a post-treatment filter, and sludge dewatering facilities. The application of this technology enables to reduce iron concentration to 0.05–0.20 mg/l, to reuse backwash water for drinking and other household purposes, or to have this water reused by iron removal stations, this, preventing pollution of water sources with iron compounds.

KEYWORDS: backwash waters, iron removal station, coagulant, phosphates, technology, dehydration, sludge, sedimentation.

FOR CITATION: Zhytsianiou B.N., Yordanova L.E. Backwash water treatment by coagulation in the presence of phosphates at underground water iron removal stations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):553-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.553-568 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Повторному использованию промывных вод в специальной литературе уделяется достаточно большое внимание [1–15]. Это обусловлено тем, что решение данной проблемы позволяет:

- снизить нагрузку на источники водоснабжения;
- уменьшить расходы воды на собственные нужды водоочистной станции, а значит, и снизить себестоимость отпускаемой воды;
- предотвратить загрязнение окружающей среды технологическими отходами очистки воды.

При обезжелезивании воды после промывки фильтров образуются промывные воды в количестве от 0,5 до 5 % от объема исходной воды, которые необходимо обрабатывать. На станциях обезжелезивания воды фильтрованием следует производить осветление отстаиванием промывных вод фильтровальных сооружений с последующей равномерной их подачей на сооружения водоподготовки¹. Обработка воды после промывки фильтров (рис. 1) включает: отстаивание для выделения из нее хлопьев гидроксида железа (III), обезвоживание и подсушивание осадка на специальных площадках. Осветленная промывная вода перекачивается в «голову» сооружений для последующей обработки вместе

с исходной водой, поступающей на фильтры обезжелезивания. Осадок, накапливающийся на дне отстойника промывных вод, направляется на иловые площадки либо сооружения по обезвоживанию.

Обезвоженный осадок вывозится автотранспортом для последующего использования или подлежит захоронению на полигоне. Как показывает практика, по истечении рекомендуемого времени отстаивания в статических условиях концентрация железа в промывной воде велика. Безреагентное осветление промывных вод в основном завершается в течение 1,5–2,0 ч. Остаточное содержание железа при этом составляет 25,0–35,0 мг/л, дальнейшее снижение концентрации железа замедляется. Количество осадка влажностью 98–99 %, образующегося после двухчасового отстаивания, достигает 3,0–5,0 % объема промывных вод [1, 6, 9, 17–19].

Возврат осветленных вод на фильтры обезжелезивания с содержанием железа в воде 25,0–35,0 мг/л в виде гидроксида железа (III) может не только увеличить концентрацию его в фильтрате, но и будет изменять соотношение двух- и трехвалентного железа в пользу последнего, что может нарушить процесс безреагентного обезжелезивания воды. При этом уменьшится продолжительность фильтроцикла из-за повышенного содержания взвешенных веществ и снизится качество очистки подземных вод.

Многие исследователи не раз пытались интенсифицировать процесс осаждения соединений

¹ ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018.

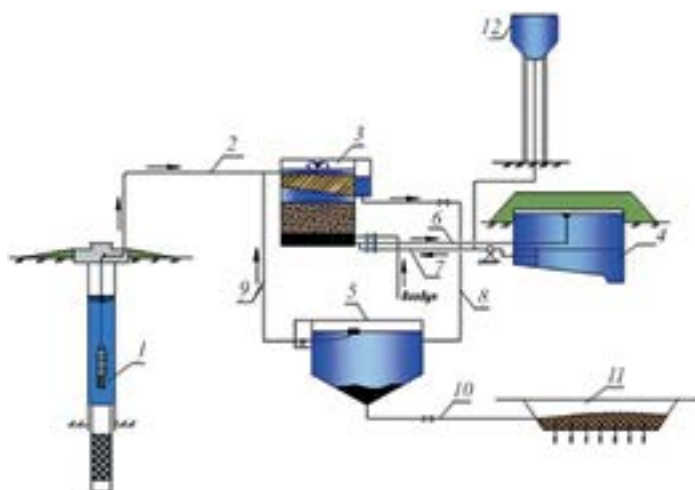


Рис. 1. Технология обработки промывных вод станций обезжелезивания: 1 — водозаборная скважина; 2 — трубопровод подачи подземных вод на фильтр обезжелезивания; 3 — фильтр обезжелезивания; 4 — резервуар чистой воды; 5 — отстойник промывных вод; 6 — трубопровод подачи фильтрата в резервуар чистой воды; 7 — трубопровод подачи воды для промывки фильтра; 8 — трубопровод отвода промывной воды в отстойник; 9 — трубопровод подачи осветленной промывной воды в «голову» сооружений; 10 — отвод осадка из отстойников на шламовые площадки; 11 — шламовые площадки; 12 — водонапорная башня промывной воды

Fig. 1. The technology of backwash water treatment at iron removal stations: 1 — water well; 2 — pipeline supply of underground water to the deferrization filter; 3 — deferrization filter; 4 — clean water tank; 5 — backwash water precipitation tank; 6 — pipeline supplying the filtrate to the clean water tank; 7 — water supply pipe for flushing the filter; 8 — pipeline drainage of backwash water into the precipitation tank; 9 — pipeline for supplying clarified backwash water to the “head” of facilities; 10 — sludge removal from settling tanks to the sludge beds; 11 — sludge beds; 12 — clean backwash water tower

железа. Г.Ю. Ассом рекомендованы для осветления промывных вод отстойники периодического действия. Особенностью предлагаемой схемы является конструкция отстойников периодического действия. Применение их целесообразно для очистки промывных вод из-за таких характеристик, как высокая способность промывных вод к осветлению, неравномерность качества и объема поступающих промывных вод. Соотношение размеров отстойника рекомендуется принимать таким, чтобы за период отстаивания успела осесть взвесь гидравлической крупностью 0,4 мм/с. Содержание железа в промывных водах после очистки на отстойниках периодического действия снижается до 12 мг/л [1].

Данные исследований, приведенные в работе [6], подтверждают, что 4-х часовое отстаивание не дает удовлетворительного эффекта осветления промывных вод: остаточная концентрация железа в воде после отстаивания составляет 15–38 мг/л. Предлагается продолжительность отстаивания в резервуарах промывных вод увеличить до 12–24 ч при использовании схемы, представленной на рис. 1. Исследования показали, что концентрация железа в осветленной воде составляла 9,0–15,0 мг/л, 0,94–1,14 мг/л при продолжительности отстаивания 6 и 24 ч соответственно. Однако опыт эксплуатации станций обезжелезивания показывает, что на большинстве водоочистных станций Республики Беларусь нет возможности увеличивать продолжительность отстаивания до 12–24 ч. Для этого необходимо реконструировать водозаборы, построить дополнительные резервуары промывных вод, предусмотреть обеззараживание, поскольку

ку при длительном пребывании воды ухудшаются микробиологические показатели. Кроме этого, резервуары промывных вод, рекомендованные строительными нормами и правилами [16], не предусматривают такое продолжительное нахождение воды в них как на станциях водоподготовки, так и на очистных сооружениях водоотведения. Увеличение продолжительности отстаивания промывных вод не решает проблему утилизации железосодержащего осадка.

В некоторых литературных источниках имеются данные по реагентной очистке промывных вод станций обезжелезивания^{2, 3} [2, 4, 20–22]. В качестве реагентов для осветления промывных вод станций водоподготовки как подземных, так и поверхностных вод опробовались коагулянты — сернокислый алюминий, хлорид железа, флокулянты. Как свидетельствуют авторы, отстаивание промывных вод, обработанных полиакриламидом (ПАА), сульфатом алюминия, вследствие невысокой плотности хлопьев взвеси является малоэффективным и не обеспечивает необходимой степени осветления.

Данные в области реагентной обработки промывных вод станций обезжелезивания недостаточно изучены, не приводятся конкретные технологические параметры процессов очистки, и в большинстве случаев предложенные методы не обеспечивают требуемый эффект очистки.

² Технологии очистки сточных вод с повышенным содержанием железа // «ГидроСтройПроект». URL: <http://www.gsp-bmt.ru/services/1/13.html>

³ Хозяйственно-питьевое водоснабжение // ЭКО-ПРОЕКТ. URL: http://www.eco-project.ru/o_kompanii1

Учитывая неудовлетворительную работу сооружений обработки промывных вод вышеперечисленными способами, схема, рекомендуемая строительными нормами (рис. 1), в большинстве случаев не используется, поэтому промывные воды сбрасываются в водоемы, водотоки или канализационную сеть.

Это обусловлено отсутствием существенных затрат, недостаточной изученностью вопроса и недооценкой отрицательного воздействия таких сбросов на природную среду [2, 5, 13, 14]. Такой способ применяется как после предварительного отстаивания промывных вод, так и без него. Основным недостатком — отрицательное воздействие на окружающую среду: загрязнение почвы, поверхностных и подземных вод, изменение состава воды водоемов (изменяется качество водотока, повышается потребность в кислороде, угнетаются процессы самоочищения, возникают иловые наносы) [5, 16, 23]. Являясь аморфным соединением, гидроксид железа (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$ сорбирует вредные вещества, поступающие в водоем (ионы тяжелых металлов, нефтепродукты, растворенные газы, сероводород и т.д.), образуя опасные очаги, так называемые «могильники». «Могильники», скапливаясь на дне водоема, представляют угрозу для обитателей водоема и человека. Спуск промывных вод от станций обезжелезивания в водные объекты нормируется, так как железо имеет токсикологический лимитирующий признак вредности. В водоемах гидроксид железа иногда становится причиной гибели рыб, так как может осаждаться на имеющей щелочную реакцию слизистой оболочке их жабр. Правительством все чаще разрабатываются документы, запрещающие сброс и загрязнение окружающей среды отходами водоочистных станций. Например, Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь разработана «Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2020 года», утвержденная решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.08.2011 № 72-Р, в которой речь идет о загрязненности водных источников республики, первоочередных мерах и задачах, связанных с недостаточно эффективной работой, с технологическим несовершенством сооружений очистки сточных вод⁴. Еще одним методом удаления промывных вод является их сброс на городские канализационные очистные сооружения (КОС) [5, 16, 24]. Транспортировка промывных вод на КОС может осуществляться по существующей водоотводящей сети, по специальному трубопроводу либо авто-

цистернами. При решении вопроса о применении сброса промывных вод станций обезжелезивания на городские КОС необходимо учитывать следующие недостатки: увеличение диаметров коллекторов для приема залпового расхода, повышение опасности засорения сетей, высокие затраты на транспортировку, повышение нагрузки на сооружения биологической очистки сточных вод минеральными веществами, поступление несвойственного для очистных сооружений загрязнения — гидроксида железа (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$, увеличение количества осадка на станции очистки сточных вод.

Таким образом, для повышения эффективности работы сооружений повторного использования промывных вод станций обезжелезивания необходимо принять меры по совершенствованию технологического режима работы с помощью перспективных методов осветления промывных вод, разработать методику расчета сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовались физико-химические, технологические, математические, микроскопические, рентгенографические методы, рентгеноэлектронная спектроскопия.

Физико-химические методы исследования. Физико-химические показатели промывных вод станций обезжелезивания и проб воды, отобранных при выполнении экспериментов, определялись по методикам вычисления измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь либо рекомендованных ГОСТ 4011-72 «Вода питьевая»^{5, 6, 7}.

Технологические методы исследования. Кинетика осветления промывных вод при безреагентном отстаивании и при обработке промывных вод реагентами изучалась в лабораторных и производственных условиях. Исследование в лабораторных условиях осуществлялось с использованием мерных цилиндров вместимостью 250 и 500 мл (рис. 2).

Электрокинетический потенциал. ξ -потенциал коллоидных частиц соединений железа промывных вод измерялся методом электрофореза. Для измере-

⁴ Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2020 года: утв. решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.08.2011 № 72-Р.

⁵ ГОСТ 4011-72. Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа. М. : Издательство стандартов, 1984. 239 с.

⁶ СТБ 1126-98. Реестр методик выполнения измерений в области экологического контроля. Минск, 2003.

⁷ Сборник методик выполнения измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь. Минск : НТЦ «АПН», 1997.



Рис. 2. Исследование кинетики осветления промывных вод станций обезжелезивания в лабораторных условиях

Fig. 2. Kinetics research of backwash water clarification of iron removal stations in laboratory conditions

ний поверхностного заряда примесей промывных вод по методу подвижной границы сконструирован прибор, аналогичный приборам Чайковского – Маляховой и Кена.

Математические методы. Для обработки экспериментальных данных и получения экспериментально-статистической модели процесса очистки промывных вод станций обезжелезивания коагулированием в присутствии фосфатов был применен метод полного факторного эксперимента [25, 26]. Для исследования области оптимальных условий использовалось ротатбельное центральное композиционное планирование (РЦКП). Это позволило получить адекватное математическое описание процесса.

Микроскопические методы. Микроскопическим исследованиям подвергались осадки, образующиеся при безреагентном отстаивании промывных вод и при очистке промывных вод коагулированием в присутствии фосфатов (рис. 3).

Визуализация результатов технологических и микроскопических исследований осуществлялась



Рис. 3. Микроскоп МКИ-2М-1

Fig. 3. Microscope MKI-2M-1

цифровой камерой Canon PowerShot A560 с последующим применением сканера MUSTEK 1200 UB Plus и программ Adobe Photoshop CS4, CorelDRAW Graphics Suite-X3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы промывной воды отбирались на коммунальных водозаборах Республики Беларусь, в том числе на водозаборах «Западный», «Граевский», «Мухавецкий», «Южный» г. Бреста, «Брилево» г. Кобрин, на водозаборе Барановичской дистанции водоснабжения и санитарно-технических устройств. На станции обезжелезивания Барановичской дистанции водоснабжения и санитарно-технических устройств РПУП «Дорводоканал Белорусской железной дороги» источником водоснабжения являлся Альб-Сеноманский водоносный горизонт, который простирается по всей территории Республики Беларусь и западным регионам РФ. Забор воды осуществляется, в основном, бесфильтровыми скважинами, обезжелезивание достигается методом упрощенной аэрации с последующим фильтрованием. Усредненные показатели качества промывных вод, справедливые для указанного водоносного горизонта, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Усредненные показатели качества промывных вод, образующихся на станции обезжелезивания

Table 1. Average quality indicators of backwash water generated at iron removal station

Показатели / Indicators	Единицы измерения / Units	Значение / Value
Железо общее ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$) / Total iron	мг/л / mg/l	150...250
Температура / Temperature	°C	7...10
Цветность / Color	град. / degrees	свыше 100 / above 100
Окисляемость перманганатная / Permanganate oxidation	мг/л·O ₂ / cO ₂	5,0...5,5
Содержание взвешенных веществ / Suspended substances	мг/л / mg/l	500...600
Жесткость карбонатная / Carbonate hardness	мг-экв/л / mEq/l	4,2...4,8
Щелочность общая / Alkalinity	мг-экв/л / mEq/l	4,6...4,8
Стабильность / Stability	—	0,92...1,00
pH	ед. pH / units pH	7,4...8,0
Ca ²⁺	мг-экв/л / mEq/l	3,7...3,9
Mg ²⁺	мг-экв/л / mEq/l	0,5...0,9
Eh	В / V	0,200...0,250

Табл. 2. Зависимость остаточного содержания железа в промывных водах от продолжительности отстаивания**Table 2.** The dependence of the residual iron content in the backwash water on the duration of sedimentation

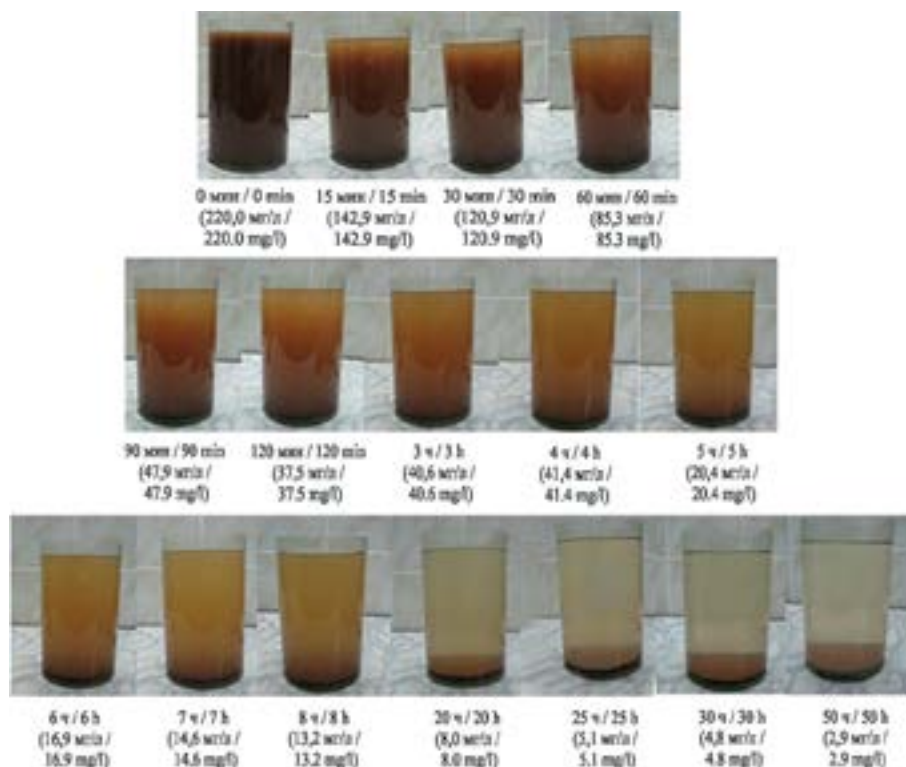
Продолжительность отстаивания, ч / Duration of sedimentation, h	0	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Содержание железа, мг/л / The iron content, mg/l	220,0	142,9	120,9	85,3	47,9	37,5	40,6	41,4	20,4	16,9
Продолжительность отстаивания, ч / Duration of sedimentation, h /	7,0	8,0	9,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	48,0	50,0
Содержание железа, мг/л / The iron content, mg/l	14,6	13,2	12,5	11,8	9,7	8,00	5,1	4,8	3,1	2,91

Первоначально проводилось безреагентное осаждение взвешенных веществ и соединений железа в промывных водах. Отстаивание осуществлялось в течение 50 ч в свободном объеме. Результаты исследования приведены в табл. 2 и на рис. 4, 5. За 3 ч отстаивания выпало около 80 % соединений железа, остаточная концентрация составила 40 мг/л. Дальнейшее снижение содержания железа резко замедляется. С 5 ч отстаивания до 10 ч концентрация железа снизилась с 20,4 до 11,8 мг/л. Частицы, находящиеся в промывной воде, отличаются малыми размерами, вследствие чего их осаждение происходит крайне медленно, так как силы диффузии преобладают над силами тяжести.

Учитывая условия формирования промывных вод станций обезжелезивания подземных вод

и полученные экспериментальные данные, можно судить о форме содержания в них железа. В промывных водах соединения железа представлены в виде грубодисперсных и коллоидных систем, что обуславливает их агрегатную устойчивость.

Промывные воды станций обезжелезивания можно отнести к полидисперсной системе, состоящей из частичек различного размера. Скорости осаждения частиц различных фракций под действием сил гравитации (гидравлические крупности) колеблются в достаточно широком диапазоне. Характер процесса осаждения такой взвеси устанавливался экспериментальным путем. По результатам опытов с использованием торсионных весов (табл. 3) построены кривая седиментации взвешенных частиц и зависимость скорости осаждения от

**Рис. 4.** Кинетика безреагентного отстаивания промывных вод станции обезжелезивания Барановичской дистанции водоснабжения и санитарно-технических устройств РПУП «Дорводоканал Белорусской железной дороги»**Fig. 4.** Kinetics of non-reagent sedimentation of backwash water at the iron removal station of the Baranavichy water supply plant and sanitary devices of Republican Production Unitary Enterprise “Dorvodokanal of the Belarusian Railway”

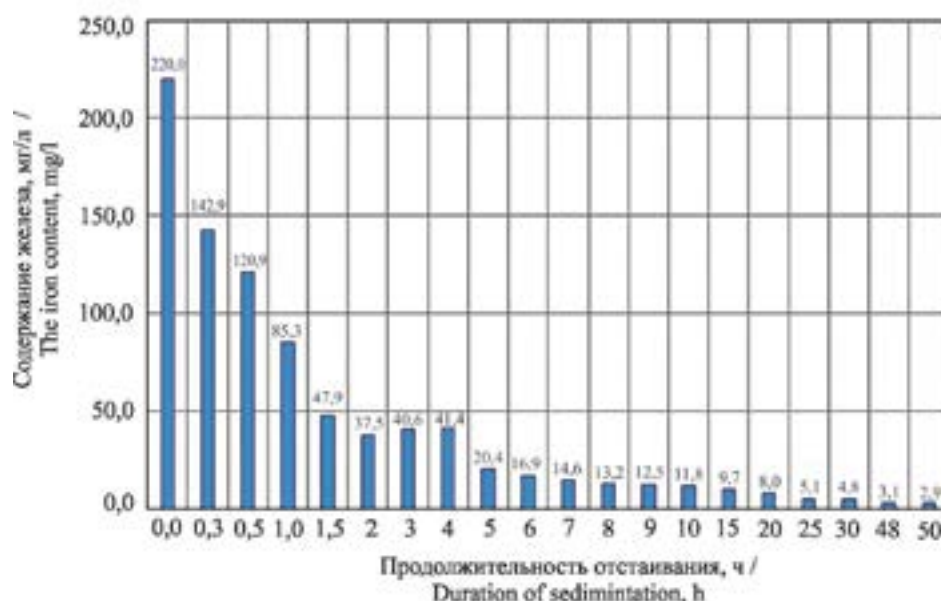


Рис. 5. Зависимость остаточной концентрации железа в промывных водах от продолжительности отстаивания

Fig. 5. The dependence of the residual iron content in the backwash water on the duration of sedimentation

Табл. 3. Результаты исследований осаждения взвешенных частиц промывных вод станций обезжелезивания

Table 3. The research results of the suspended particles sedimentation in backwash water of iron removal stations

Номер опыта / Experience number	Время отстаивания, мин / Settling time, min	Содержание взвешенных веществ, мг/л / The content of suspended substances, mg/l		Количество выпавшей взвеси (эффект осветления), % / The amount of precipitated suspension, %	Скорость осаждения взвеси, мм/с / Suspension sedimentation rate, mm/s
		в исходной воде / in source water	в пробе после отстаивания / in the sample after settling		
1	2	500	333,5	49,1	2,0
2	5	500	240,0	63,4	0,9
3	10	500	190,0	71,0	0,5
4	20	500	124,33	79,4	0,2
5	30	500	120,0	81,7	0,1
6	60	500	93,33	85,8	0,1
7	120	500	46,67	92,9	0,04
8	180	500	37,0	94,4	0,02
9	240	500	30,0	95,4	0,02

продолжительности отстаивания промывных вод станций обезжелезивания (рис. 6, 7).

Из анализа кривой осаждения видно, что начальный участок кривой с 0 до 30 мин отстаивания проходит круто, что свидетельствует о большой крупности взвеси и ее неоднородности: в осадок выпадают частицы, скорость осаждения которых колеблется от 2–0,9 до 0,9–0,1 мм/с. При времени осаждения 1–4 ч кривая проходит более полого, т.е. взвесь более однородна и осаждается медленно. За период 2–4 ч кривая приобретает характер, близкий к линейному, и при этом эффект осветления увеличивается лишь на 2,5 % (содержание взвешенных веществ снижается с 47 до 30 мг/л). При дальнейшем отстаивании осветление промывной воды незначительно, в воде остаются мелкие хлопья соединений железа и взвешенных веществ, гидрав-

лическая крупность частиц при этом очень мала — менее 0,04 мм/с, что в очередной раз подтверждает наличие соединений железа в коллоидной форме. Таким образом, четырехчасовое отстаивание — недостаточно из-за повышенных концентраций железа и содержания взвешенных веществ.

Важной характеристикой коллоидного раствора является электрокинетический ξ -потенциал. Знание его величины позволяет судить об устойчивости коллоидного раствора, поскольку изменение этого показателя, как правило, происходит пропорционально изменению электрокинетического потенциала. Для определения электрокинетического потенциала (ξ -потенциала) коллоидных частиц $\text{Fe}(\text{OH})_3$, вымытых из фильтров, проведены его измерения методом электрофореза. В процессе промывки фильтра коллоидные частицы железа приобретают

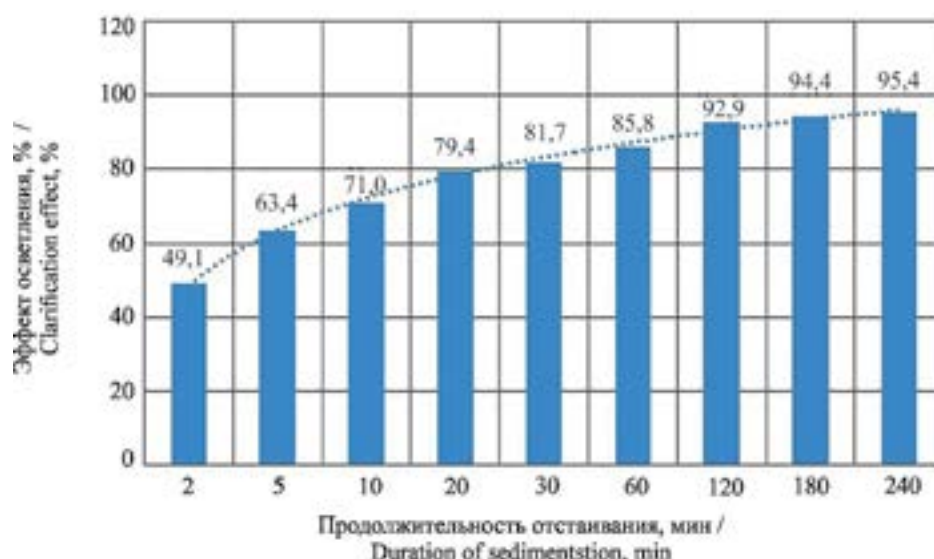


Рис. 6. Зависимость эффекта осветления промывных вод от продолжительности отстаивания

Fig. 6. The dependence of the clarification effect of backwash water on the duration of sedimentation

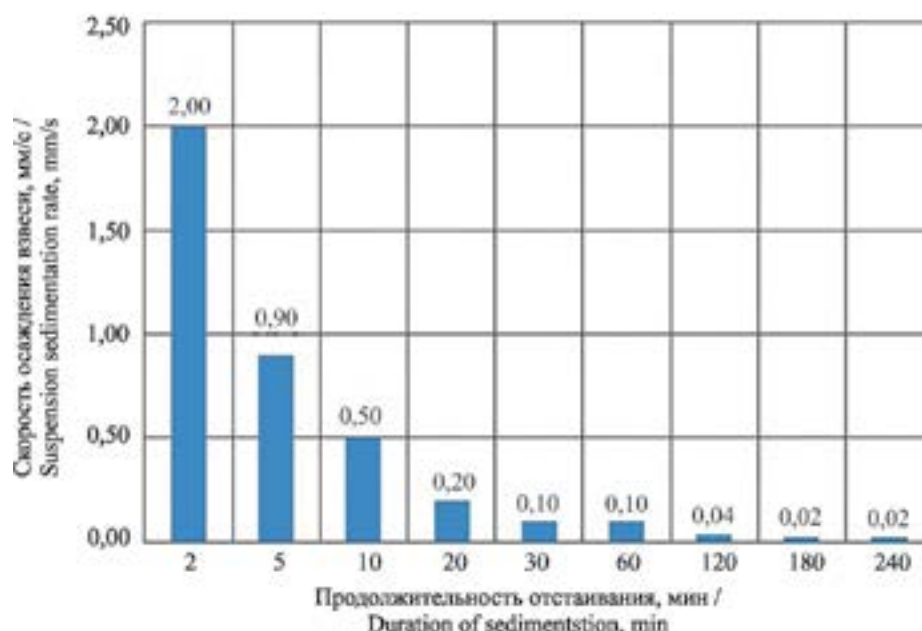


Рис. 7. Зависимость скорости осаждения частиц взвеси от продолжительности отстаивания

Fig. 7. Dependence of the sedimentation rate of suspended substances on the duration of sedimentation

отрицательный заряд, величина электрокинетического потенциала в среднем составляет $\xi = 40,45$ мВ (табл. 4), что обуславливает возникновение межмолекулярных сил отталкивания и агрегативно устойчивую систему [28–30].

Вследствие того, что безреагентное осветление является неэффективным, были проведены эксперименты по интенсификации процесса осаждения примесей соединений железа из промывных вод. Заряд коллоидных частиц можно снизить до нуля или очень малых значений путем обработки воды различными коагулянтами, которые нарушают агрегативную устойчивость либо образуют вследствие гидро-

лиза коллоиды, на которых сорбируются примеси.

Для осаждения железа из промывных вод станций обезжелезивания был опробован коагулянт «Аква-Аурат – 30». Отстаивание промывных вод с содержанием железа 120 мг/л осуществлялось в цилиндрах емкостью 500 мл в течение 2 ч. Пробы воды отбирались после отстаивания в течение двух часов и после фильтрования. Кинетика осветления промывных вод при обработке коагулянт «Аква-Аурат – 30» представлена на рис. 8. При его использовании получены хорошие результаты — образовывались крупные хлопья, которые быстро оседали на дно цилиндра. После фильтрования concentra-

Табл. 4. Результаты измерений электрокинетического потенциала промывных вод

Table 4. Measurement results of Zeta potential in backwash water

Показания вольтметра U , В / Voltmeter readings U , V	Расстояние между электродами, м / The distance between the electrodes l , m	Градиент потенциала H , В/м / Potential gradient H , V/m	Время от начала опыта, мин / Time from the start of the experiment, min.	Перемещение границы золя в коленях, м / Moving the boundary of the sol in the knees, m		Среднее по двум коленям перемещение границы, м / Border displacement average over two knees, m	Электрофоретическая подвижность частиц v_{ϕ} , м ² /(с·В) / Electrophoretic particle mobility v_{ϕ} , m ² /(s·V)	Величина ζ -потенциала В / The value of the zeta potential
				левом / left	правом / right			
100	0,54	185,185	10	0,002	0,002	0,002	$1,80 \cdot 10^{-8}$	0,03768
100	0,54	185,185	20	0,005	0,004	0,0045	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,04239
100	0,54	185,185	30	0,006	0,007	0,0065	$1,95 \cdot 10^{-8}$	0,04082
100	0,54	185,185	40	0,008	0,008	0,008	$1,80 \cdot 10^{-8}$	0,03768
100	0,54	185,185	50	0,011	0,012	0,0115	$2,07 \cdot 10^{-8}$	0,043332
100	0,54	185,185	60	0,013	0,013	0,013	$1,95 \cdot 10^{-8}$	0,04082

$$\xi_{\text{ср.}} = 40,45 \text{ мВ / мВ}$$

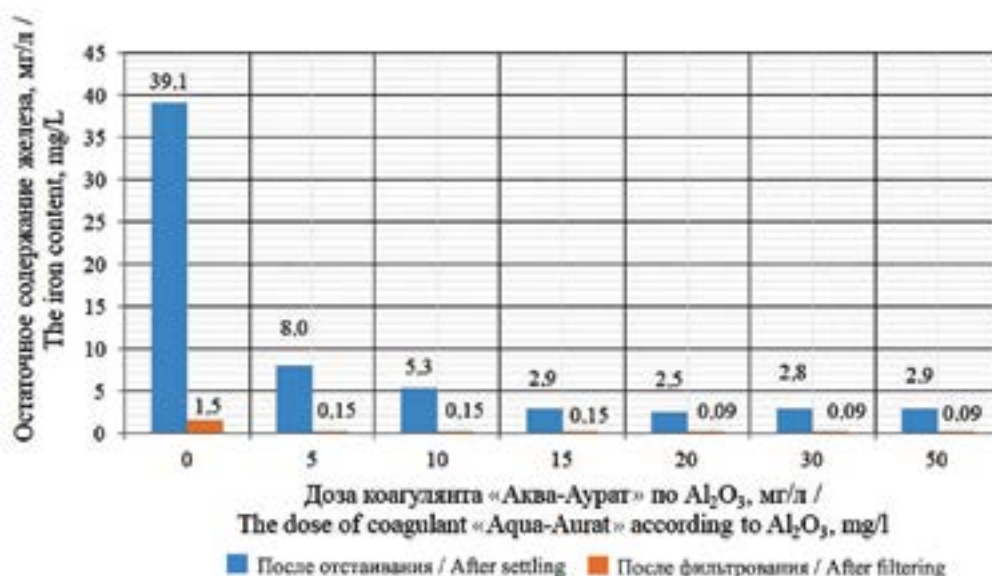


Рис. 8. Зависимость остаточной концентрации железа в промывных водах от дозы коагулянта «Аква-Аурат» (продолжительность отстаивания 2 ч)

Fig. 8. Dependence of the residual concentration of iron in backwash water on the dose of the coagulant “Aqua-Aurat” (settling time 2 hours)

ция железа не превышала 0,3 мг/л при дозах коагулянта 5 мг/л и выше. Однако осадок, образующийся при обработке промывных вод коагулянт «Аква-Аурат», влажность которого достигала 99,9 %, имел рыхлую структуру, что отрицательно сказалось на его обезжелезивании. Для устранения этой проблемы в качестве реагента для осаждения соединений железа из промывных вод станции обезжелезивания был опробован фосфат натрия $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. В настоящее время фосфат натрия применяется для предотвращения коррозии стальных и чугунных труб как производственных, так и хозяйственно-пи-

товых водопроводов, для борьбы с образованием накипи, стабилизационной обработки воды при ее высокой минерализации, при умягчении воды. Применение фосфата натрия основано на его свойстве переводить железо, кальций, магний в нерастворимые или малорастворимые фосфаты, которые впоследствии отделяются в осветлителях, отстойниках или фильтрах.

В обрабатываемой воде при введении Na_3PO_4 в растворе имеются анионы H_2PO_4^- и PO_4^{3-} . Наличие отрицательно заряженных ионов в воде интенсифицирует процесс коагуляции примесей. При гидроли-

зе Na_3PO_4 в растворе получается фосфатная буферная смесь ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$), поддерживающая pH выше 7, что достаточно для полного осаждения фосфат-ионов в виде фосфата железа.

Эффективность обезжелезивания и осветления промывных вод станции обезжелезивания подземных вод исследовалась при совместном введении коагулянта сульфата алюминия и реагента фосфата натрия. Результаты исследования приведены на рис. 9.

Максимальный эффект очистки достигался при введении в промывную воду фосфата натрия дозами 70 и 100 мг/л и составлял 98,66; 98,75; 99,00 % при дозах $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ — 50, 70, 100 мг/л соответственно. Раздельное введение реагентов малоэффективно, совместное — сопровождается значительным повышением эффекта обезжелезивания при отстаивании. Зависимость остаточной концентрации железа от продолжительности отстаивания при дозе фосфата натрия 70 мг/л и дозе сульфата алюминия 100 мг/л приведена на рис. 10.

После четырехчасового отстаивания концентрация железа снизилась до 0,3 мг/л, что не превышает предельно допустимую концентрацию.

Для получения математической модели процесса очистки промывных вод станций обезжелезивания коагулированием в присутствии фосфатов реализован полный трехфакторный эксперимент с применением метода РЦКП. Основные характеристики плана эксперимента приведены в табл. 5.

В результате проведенных опытов получено уравнение регрессии (1), описывающее совместное

влияние дозы сульфата алюминия, дозы фосфата натрия и продолжительности отстаивания на остаточное содержание железа в промывных водах:

$$Y = 2,46 - 0,774 \cdot X_1 - 0,37 \cdot X_2 - 0,8243 \cdot X_3 + 0,2226 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,163 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,042 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0415 \cdot X_1^2 - 0,0728 \cdot X_2^2 + 0,0549 \cdot X_3^2, \quad (1)$$

где X_1, X_2, X_3 — доза сульфата алюминия, доза фосфата натрия и продолжительность отстаивания соответственно в кодированных переменных. Проверка адекватности была осуществлена по критерию Фишера ($F_{\text{расч}} = 2,76, F_{\text{табл}} = 5,05$).

Из уравнения (1) видно, что все исследуемые факторы оказывают влияние на процесс очистки промывных вод, но сила их воздействия неодинакова. Влияние отдельных факторов на процесс очистки промывных вод исследовалось на основании частных решений уравнения (1) (рис. 11–13).

Эффект очистки промывных вод наиболее сильно зависит от дозы сульфата алюминия при дозе фосфата натрия 30 мг/л (рис. 11). При увеличении дозы $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ концентрация железа снижалась, при дозе фосфата натрия 70 мг/л, эффект очистки — около 99 %. С увеличением дозы сульфата алюминия сила влияния дозы фосфата натрия ослабевает, о чем свидетельствует меньший наклон кривых.

Увеличение дозы фосфата натрия (рис. 12) от 30 до 70 мг/л снизило остаточную концентрацию железа с 1,5 до 0,5 мг/л при дозе $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 70 мг/л и продолжительности отстаивания 180 мин, при этом эффект обезжелезивания составил 99,7 %. Кривые имеют большой угол наклона и проходят почти параллельно друг другу. Это свидетельствует

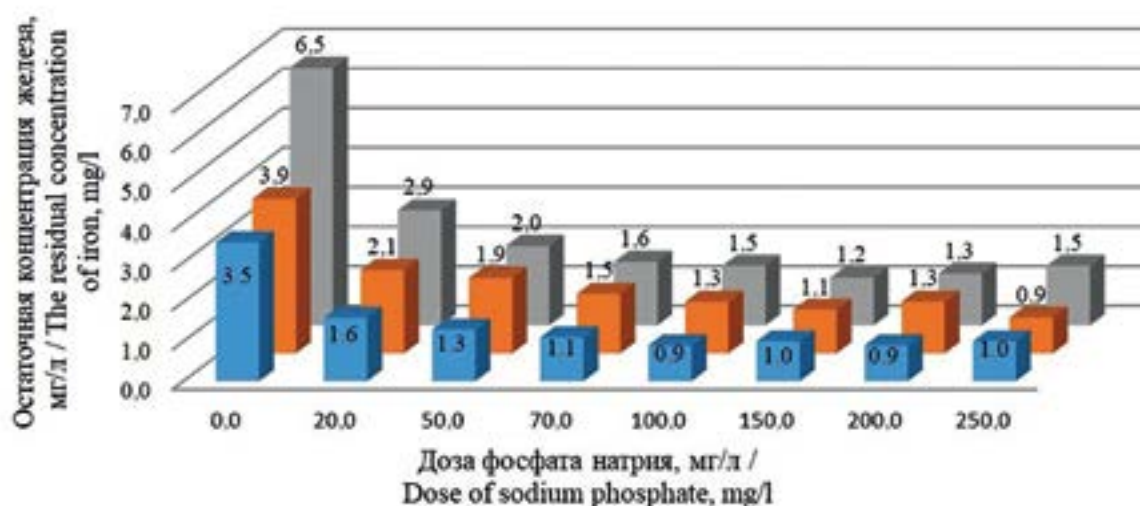


Рис. 9. Зависимости остаточной концентрации железа при обработке промывной воды фосфатом натрия и сульфатом алюминия (продолжительность отстаивания 2 ч): доза сульфата алюминия 50 мг/л; доза сульфата алюминия 70 мг/л; доза сульфата алюминия 100 мг/л

Fig. 9. Dependences of the residual concentration of iron during the treatment of backwash water with sodium phosphate and aluminum sulfate (settling time 2 hours): dose of aluminum sulfate 50 mg/l; dose of aluminum sulfate 70 mg/l; dose of aluminum sulfate 100 mg/l

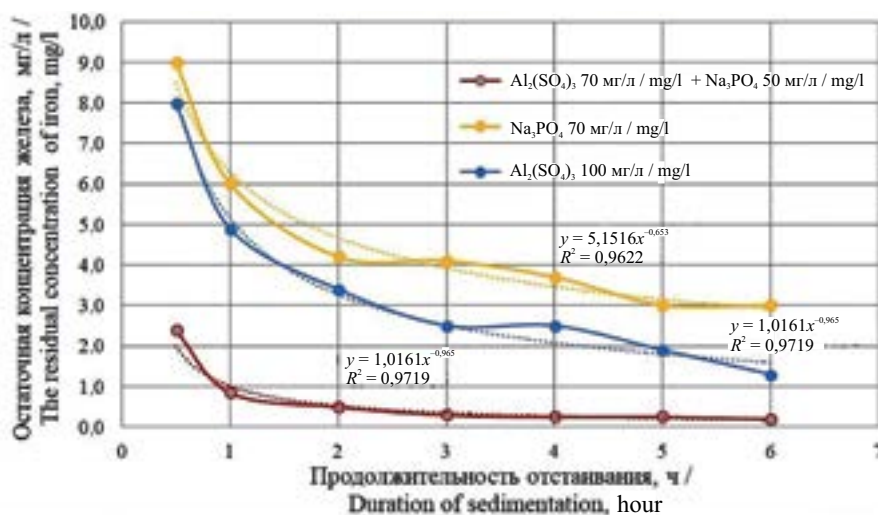


Рис. 10. Зависимость остаточной концентрации железа в промывной воде от времени отстаивания при раздельной и совместной обработке Na_3PO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Fig. 10. Dependence of the residual iron concentration in backwash water on the settling time during separate and combined treatment with Na_3PO_4 and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

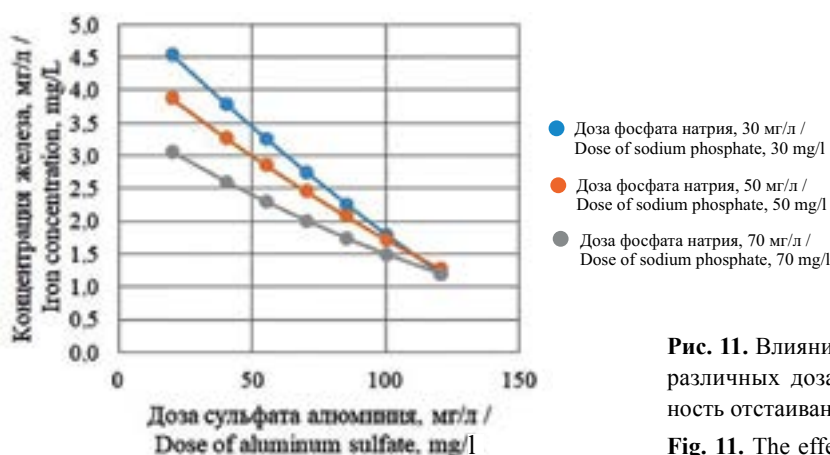


Рис. 11. Влияние дозы сернокислого алюминия при различных дозах фосфата натрия (продолжительность отстаивания 120 мин)

Fig. 11. The effect of the dose of aluminum sulfate at various doses of sodium phosphate, the duration of sedimentation 120 minutes

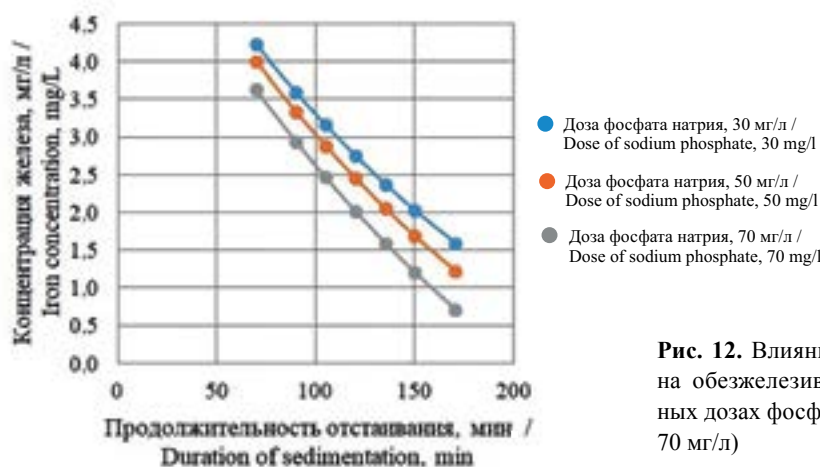


Рис. 12. Влияние продолжительности отстаивания на обезжелезивание промывных вод при различных дозах фосфата натрия (доза сульфата алюминия 70 мг/л)

Fig. 12. The effect of the settling time on the iron removal from backwash water at various doses of sodium phosphate (dose of aluminum sulfate 70 mg/l)

Табл. 5. Основные характеристики плана эксперимента

Table 5. Key features of the experiment plan

Факторы / Factors	Доза $Al_2(SO_4)_3$, мг/л (X1) / Dose $Al_2(SO_4)_3$, mg/l (X1)	Доза Na_3PO_4 , мг/л (X2) / Dose Na_3PO_4 , mg/l (X2)	Продолжительность отстаивания, мин (X3) / Duration of sedimenta- tion, min (X3)
Основной уровень (0) / Basic level (0)	70	50	120
Интервал варьирования / Range of variation	30	20	30
Верхний уровень (+1) / Upper Level (+1)	100	70	150
Нижний уровень (-1) / Lower level (-1)	40	30	90

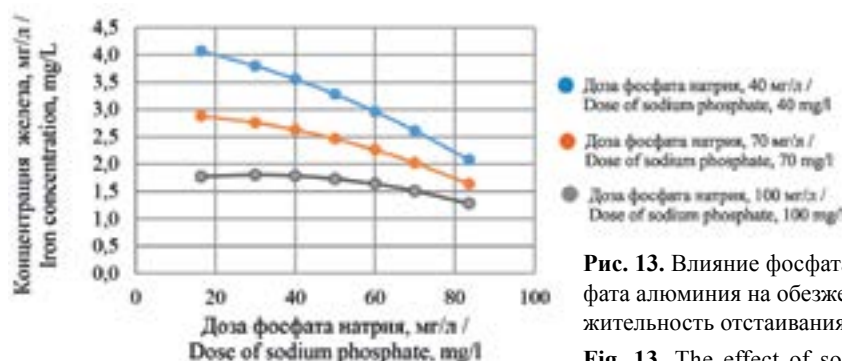


Рис. 13. Влияние фосфата натрия при различных дозах сульфата алюминия на обезжелезивание промывных вод, продолжительность отстаивания 120 мин

Fig. 13. The effect of sodium phosphate at various doses of aluminum sulfate on the deferrization of wash water (the settling time is 120 minutes)

Табл. 6. Показатели качества промывной воды после очистки коагулированием в присутствии фосфатов

Table 6. Quality parameters of backwash water after coagulation treatment in the presence of phosphates

Показатель / Indicator	Исходная вода / Source water	После отстаивания (2 ч) / After settling (2 hours)	После механической очистки / After mechanical cleaning	Требования СанПиН / Sanitary Rules and Regulations
Концентрация железа, мг/л / The concentration of iron, mg/l	100–200	1,0–2,0	0,1–0,2	0,3
Взвешенные вещества, мг/л / Suspended substances, mg/l	—	1,5–2,0	—	1,5–2,0
Цветность, град. / Color, degrees	более 100 / more then 100	менее 20 / less then 20	менее 20 / less then 20	20
Жесткость карбонатная, мг-экв/л / Carbonate hardness, mEq/l	4,2–4,8	4,0	3,5–3,8	—
Жесткость общая, мг-экв/л / Hardness total, mEq/l	4,2–4,9	4,2	3,6–4,0	—
Щелочность общая, мг-экв/л / Alkalinity total, mEq/l	4,6–4,8	3,3	3,6	—
pH	7,0–8,0	7,5–8,0	7,5–8,0	7,0–8,0
Окислительно-восстановительный потенциал системы Eh, В / Redox potential of the system Eh, V	0,15–0,25	0,228	0,244	—
Свободная углекислота, мг/л / Free carbon dioxide, mg/l	13,2–15,5	3,5–4,0	3,5–4,0	—
Стабильность / Stability	0,92–0,96	0,93–0,97	~1	1
Перманганатная окисляемость, мгО/л / Permanganate oxidation, mgO/l	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,0	5,0
Кальций, мг-экв/л / Calcium, mEq/l	3,6–3,9	3,6–3,7	3,2–3,5	—
Магний, мг-экв/л / Magnesium, mEq/l	0,5–0,9	0,6–0,7	0,4–0,5	—
Алюминий, мг/л / Aluminum, mg/l	—	0,2–0,4	0,2–0,4	менее 0,5 / less then 0,5
Сульфаты, мг/л / Sulfates, mg/l	3,5–11,5	10–100	10–100	500
Фосфаты, мг/л / Phosphates, mg/l	—	1,0–1,5	0,5–1,0	менее 3,5 / less then 3,5

о том, что продолжительность отстаивания является весьма значимым фактором при очистке промывных вод коагулированием в присутствии фосфатов.

Влияние дозы сульфата алюминия особенно сказывалось при невысоких дозах фосфата натрия (рис. 13). Введение 40 мг/л сульфата алюминия снижало концентрацию железа до 3,2 мг/л при дозе Na_3PO_4 20 мг/л и до 1,2 мг/л при дозе сульфата алюминия 100 мг/л. При дальнейшем увеличении дозы фосфата натрия процесс обезжелезивания затормаживался.

У осадков, образующихся при очистке промывных вод коагулированием в присутствии фосфатов, улучшается влагоотдача. В частности, влажность обезвоженного осадка при центрифугировании уменьшилась с 99,0 до 82,0 % при индексе центрифугирования $I = 4$. Выявлена высокая способность таких осадков к обезвоживанию на вакуум-фильтре. Осадок имел удельное сопротивление $14 \cdot 10^{10}$ см/г, влажность осадка составила 74,4 %.

В табл. 6 приведены физико-химические показатели качества промывных вод станций обезжелезивания, обработанных реагентами фосфатом натрия и сульфатом алюминия, после отстаивания в течение двух часов и после фильтрования.

Анализируя данные табл. 6, можно сделать выводы о дальнейшем использовании промывных вод, обработанных фосфатом натрия и сульфатом алюминия. Возможны следующие варианты:

- после отстаивания и удаления осадка вода через механический фильтр перекачивается в голову сооружений;
- после отстаивания и удаления осадка вода через механический фильтр перекачивается в резервуары чистой воды;
- после отстаивания и удаления осадка вода используется повторно для промывки фильтров с помощью промывного насоса (требуется не менее двух секций отстойников промывных вод);
- после отстаивания и удаления осадка вода перекачивается в водонапорную башню промывной воды и используется для промывки фильтров.

При реконструкции сооружений повторного использования промывных вод станций обезжелезивания подземных вод принятые решения необходимо обосновывать результатами предпроектных исследований, выполненных непосредственно на станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Системный анализ качественного и количественного состава промывных вод позволил установить характер формирования промывных

вод в процессе обезжелезивания подземных вод фильтрованием с предварительной упрощенной и глубокой аэрацией. В результате проведенной статистической обработки выявлено: усредненная концентрация железа в промывных водах, образующихся при водовоздушной промывке, составляет 100–200 мг/л, при водяной — 70–150 мг/л.

Установлено, что в промывных водах величина окислительно-восстановительного потенциала Eh составляет от +0,150 В до +0,250 В, $pH = 7-8$, при которых железо присутствует в форме гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_3$, грубодисперсных и коллоидных, и частично в виде Fe^{2+} . Электрокинетический потенциал коллоидных частиц железа в промывных водах составляет $\xi = -40$ мВ, что обуславливает агрегативную устойчивость системы.

Выявлено, что при совместной обработке высококонцентрированных железосодержащих промывных вод станций обезжелезивания реагентом фосфатом натрия Na_3PO_4 и коагулянтом сульфатом алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ интенсифицируется процесс осаждения соединений железа — образуются коллоидные частицы FePO_4 , обладающие очень низкой растворимостью, которые эффективно удаляются коагуляцией. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что анионы H_2PO_4^- и PO_4^{3-} , образующиеся при гидролизе фосфата натрия Na_3PO_4 , способствуют снижению электрокинетического заряда коллоидной частицы гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, а высокая степень очистки до 99,0–99,9 % достигается путем фиксации соединений железа на поверхности коллоидной частицы гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Экспериментально установлено, что для глубокой доочистки промывных вод, прошедших стадию реагентного гравитационного осветления, перед обеззараживанием (при необходимости) и подачей очищенных вод для повторного использования целесообразно использовать механические осветлительные фильтры. Так, в процессе фильтрования происходит отделение скоагулированных не осевших частиц примесей, обеспечивающих остаточную концентрацию железа менее 0,1–0,3 мг/л, что соответствует эффекту очистки более 99,7 %. При этом остаточное содержание алюминия, фосфатов и сульфатов не превышает предельно допустимые концентрации.

Процесс интенсификации очистки промывных вод коагулированием в присутствии фосфатов повышает эффективность обезвоживания образующихся осадков до 74,4 % при вакуум-фильтровании и 82,0 % при центрифугировании.

Предложены варианты дальнейшего использования промывных вод, обработанных фосфатом натрия и сульфатом алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асс Г.Ю. Очистка сточных вод станций обезжелезивания // Водоснабжение и санитарная техника. 1969. № 3. С. 26–28.
2. Новиков М.Г., Иванова Н.Г., Дмитриева Л.П. Утилизация промывных вод фильтровальных сооружений на водоочистных станциях // Вода и экология. 2000. № 1.
3. Гуринович А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения. Минск : ТЕХНОПРИНТ, 2001. 305 с.
4. Журба М.Г., Чекрышов А.В., Говорова Ж.М. Обработка промывных вод и осадков водопроводных станций // Обзорная информация. Сер. инженерное обеспечение объектов строительства. М. : ВНИИТПИ, 2001. Вып. 1.
5. Журба М.Г., Приемышев Ю.Р. Обработка и удаление промывных вод водопроводных очистных станций // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 6. С. 2–6.
6. Михайлик Л.Г. Отстаивание и оборот промывных вод на станциях обезжелезивания подземных вод // Вода. 2003. № 6.
7. Драгинский В.Л., Алексеева Л. П. Обработка промывных вод фильтров водоочистных станций // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 8. С. 25–31.
8. Шефер М.П. Особенности образования и обработки технологических сточных вод станций обезжелезивания в северных регионах // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе: кадровое и научно-техническое обеспечение процессов интеграции в мировую транспортную систему : междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, 2007. Новосибирск : СГУПС, 2007. Ч. 1. С. 275–276.
9. Алферова Л.И., Курочкин Е.И., Дзюбо В.В. Повторное использование промывных вод и утилизация осадка на станциях очистки подземных вод // Водоочистка. 2008. № 6. С. 26–31.
10. Жагин В.А., Шоколов А.Н., Урванцева М.И., Артеменок Н.Д. Обработка промывных вод водопроводных станций зарегулированных источников // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 3. С. 24–29.
11. Пазенко Т.Я., Колова А.Ф. Обработка промывных вод фильтров водоподготовки // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 9. С. 65–68.
12. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Кармазов А.И., Сколубович А.Ю. Очистка и утилизация промывных вод скорых фильтров станций обезжелезивания // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. Ч. 1. № 9. С. 34–39.
13. Алексеева Л.П. Влияние условий образования и состава промывных вод фильтров на процесс их очистки // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 8. С. 18–24.
14. Артеменок Н.Д., Похил Ю.Н., Мамаев В.В. Усовершенствование процесса обработки промывных вод и осадков водопроводных станций г. Новосибирска // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 4. С. 34–37.
15. Новак В.А., Гуринович А.Д. Проблем с водой нет, с водоснабжением — в избытке // Вода. 2000. № 8. С. 3–4.
16. Любарский В.М. Осадки природных вод и методы их обработки. М. : Стройиздат, 1980. 128 с.
17. Курочкин Е.Ю., Христофорова И.Н. Создание безотходной технологии на очистных станциях обезжелезивания подземных вод // Водоснабжение и водоотведение: качество и эффективность : тр. 2-ой Междунар. науч.-техн. конф. Томск, 1999.
18. Курочкин Е.Ю., Дзюбо В.В. Проблемы оборотного водоснабжения на подземных водозаборах и пути их решения // Шаг в будущее : труды Третьего Международного научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. Томск : ТГАСУ, 1999.
19. Житенев Б.Н., Шеина Л.Е. Проблемы повторного использования промывных вод станций обезжелезивания воды // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и экология. 2002. № 2 (14). С. 31–32.
20. Платонов А.П., Ковчур С.Г., Кондратенкова В.А. Утилизация неорганических отходов водочистительных станций водозаборов // Информационный бюллетень. Минск : ОДО “ЛОРАНЖ-2”, 2001. № 1 (29). 24 с.
21. Чайковский Г.П., Кофтелева С.Г., Сотников Е.В. Повторное использование промывных вод фильтров станции обезжелезивания воды при высоких концентрациях железа в источнике водоснабжения // Совершенствование систем ж.-д. водоснабжения и водоотведения в р-нах Дальнего Востока, в зоне БАМ и Забайкалья. Хабаровск, 1986. С. 40–45.
22. Феофанов Ю.А. Новые виды флокулянтов // Водоснабжение и санитарная техника. 1995. № 1. С. 5–6.
23. Артеменюк Н.Д., Урванцева М.И. Обработка промывных вод и осадков водопроводных станций зарегулированных источников // Вода: экология и технология : 7-й Междунар. конгр., ЭКВАТЕК – 2006, Москва, 30 мая–2 июня 2006 г. М., 2006.
24. Макаров В.В., Шиблева Л.Г. Реализация технологии электрокоагуляционной очистки промывных вод станций обезжелезивания на Тюменском севере // Вода: экология и технология : 7-й

Международ. конгр., ЭКВАТЕК – 2006, Москва, 30 мая–2 июня 2006 г. М., 2006.

25. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975.

26. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2003. 230 с.

27. Агафонова Е.И., Карпенко П.Г., Рябина Л.В. Практикум по физической и коллоидной химии: учеб. пособие для хим.-механ. и хим.-технол. техникумов. М.: Высшая школа, 1985. 167 с.

28. Бугреева Е.В. и др. Практикум по физической и коллоидной химии: учеб. пособие для фармацевтических вузов и факультетов / под общ. ред. К.И. Евстратовой. М.: Высшая школа, 1990. 255 с.

29. Фролов Ю.Г. и др. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под общ. ред. Ю.Г. Фролова и А.С. Гродского. М.: Химия, 1986. 216 с.

30. Станкявичюс В.И. Обезжелезивание воды фильтрованием (основы теории и расчет установок). Вильнюс: Мокслас, 1978. 120 с.

Поступила в редакцию 29 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

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

Людмила Евгеньевна Йорданова — кандидат технических наук, доцент; **Независимый исследователь**; Республика Беларусь, г. Брест; lesheina@mail.ru.

REFERENCES

1. Ass G.Yu. Wastewater treatment of Iron Removal Stations. *Water supply and sanitary equipment*. 1696; 3:26-28. (rus.).
2. Novikov M.G., Ivanova N.G., Dmitriyeva L.P. Disposal of backwash water of filter facilities at water treatment stations. *Water and Ecology*. 2000; 1. (rus.).
3. Gurinovich A.D. *Drinking water supply from underground sources: problems and solutions*. Minsk, 2001; 305. (rus.).
4. Zhurba M.G., Chekryshov A.V., Govorova ZH.M. Treatment of backwash water and sludge from water supply plants. *Overview. Series of engineering support of construction projects*. Moscow, 2001; 11. (rus.).
5. Zhurba M.G., Priyemyshev Yu.R. Treatment and disposal of backwash water from water supply plants. *Water supply and sanitary equipment*. 2001; 6:2-6. (rus.).
6. Mikhaylik L.G. Sedimentation of Backwash water and its circulation at underground water supply station. *Water*. 2003; 6. (rus.).
7. Draginskiy V.L., Alekseyeva L.P. Treatment of Backwash water at water supply plants. *Water supply and sanitary equipment*. 2005; 8:25-31. (rus.).
8. Shefer M.P. Features of the formation and treatment of technological waste water from iron removal stations in the northern regions. *Actual problems of the Trans-Siberian Railway at the present stage. Personnel and scientific and technical support for the processes of*

integration into the global transport system: International scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Siberian State University of Railway Engineering. Novosibirsk, 2007; 1:275-276. (rus.).

9. Alferova L.I., Kurochkin Ye.I., Dzyubo V.V. Reuse of backwash water and disposal of sludge at underground water treatment plants. *Water Treatment*. 2008; 6:26-31. (rus.).

10. Zhagin V.A., Shokolov A.N., Urvantseva M.I., Artemenok N.D. Treatment of backwash water of water supply plants of regulated sources. *Water supply and sanitary equipment*. 2009; 3:24-29. (rus.).

11. Pazenko T.Ya., Kolova A.F. Treatment of Backwash water of water supply filters. *News of universities*. Construction. 2010; 9:65-68. (rus.).

12. Skolubovich Yu.L., Voytov Ye.L., Karmalov A.I., Skolubovich A.Yu. Treatment and disposal of backwash water of fast filters at Iron Removal stations. *Water supply and sanitary equipment*. 2011; 1(9):34-39. (rus.).

13. Alekseyeva L.P. The influence of formation conditions and composition of backwash water on the cleaning process. *Water supply and sanitary equipment*. 2011; 8:18-24. (rus.).

14. Artemenok N.D., Pokhil Yu.N., Mamayev V.V. Improving the treatment process of backwash water and sludge from water supply plants in Novosibirsk. *Water supply and sanitary equipment*. 2014; 4:34-37. (rus.).

15. Novak V.A. There are no problems with water, there are plenty of — with water supply. *Water*. 2000; 8:3-4. (rus.).
16. Lyubarskiy V.M. *Precipitation of natural waters and methods for their treatment*. Moscow, Stroyizdat, 1980; 128. (rus.).
17. Kurochkin Ye.Yu., Khristoforova I.N. Creation of non-waste technology at underground water iron removal plants. *Water Supply and Sanitation: Quality and Efficiency: proceedings of the 2nd international scientific and technical conference*. Tomsk, 1999. (rus.).
18. Kurochkin Ye.Yu., Dzyubo V.V. Problems of recycle water supply in underground water intakes and ways of their solutions. *Step into the Future. Proceedings of the Third International Scientific Symposium of students, graduate students and young scientists named after academician M.A. Usova*. Tomsk, 1999. (rus.).
19. Zhitenev B.N., Sheina L.Ye. Problems of recycle of backwash water from water iron removal stations. *Brest State Technical University Journal. Water management, heat power and ecology*. 2002; 2(14): 31-32. (rus.).
20. Platonov A.P., Kovchur S.G., Kondratenkova V.A. Disposal of inorganic waste from water treatment plants. *News bulletin*. Minsk, ODO "LORANGE-2", 2001; 1(29):24. (rus.).
21. Chaykovskiy G.P., Kofteleva S.G., Sotnikov Ye.V. Reuse of backwash water from the filters of the iron removal station at high concentrations of iron in the water supply source. *Improvement of railway water supply and sanitation systems in the Far East, in the zone of the Baikal-Amur Mainline and Transbaikalia*. Khabarovsk, 1986; 40-45. (rus.).
22. Feofanov Yu.A. New types of flocculants. *Water supply and sanitary equipment*. 1995; 1:5-6. (rus.).
23. Artemenyuk N.D., Urvantseva M.I. Treatment of backwash water and sludge of water supply plants from regulated water sources. *7th International Congress "Water: Ecology and Technology" EQUATEK*. Moscow, 2006, May 30–June 2. (rus.).
24. Makarov V.V., Shibleva L.G. Implementation of the technology of electrocoagulation treatment of backwash water of Iron Removal stations in the Tyumen North. *7th International Congress "Water: Ecology and Technology" EQUATEK*. Moscow, 2006, May 30–June 2. (rus.).
25. Sautin S.N. *Planning an experiment in chemistry and chemical technology*. Leningrad, Khimiya, 1975. (rus.).
26. Kichigin V.I. *Modeling of water treatment processes: a training manual*. Moscow, Publishing house of the Association of construction universities, 2003; 230. (rus.).
27. Agafonova Ye.I., Karpenko P.G., Ryabina L.V. *Workshop on physical and colloid chemistry: study. manual for chemical-mechanical and chemical-technological technical schools*. Moscow, 1985; 167. (rus.).
28. Bugreyeva Ye.V. et al. *Workshop on physical and colloid chemistry: A manual for pharmaceutical universities and faculties*. Moscow, 1990; 255. (rus.).
29. Frolov Yu.G. et al. *Laboratory jobs and tasks in colloid chemistry*. Moscow, 1986; 216. (rus.).
30. Stankyavichyus V.I. Deferrization of water by filtration (the basis of theory and calculation of installations). Vilnius, Moxlas, 1978; 120. (rus.).

Received January 29, 2020.

Adopted in a revised form on February 20, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

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

Lyudmila E. Yordanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Independent researcher**; Brest, Republic of Belarus; lesheina@mail.ru.

Численные расчеты, проектирование и поведение каменно-насыпных плотин с железобетонными экранами при сейсмических воздействиях

Ю.П. Ляпичев^{1,2}

¹Международная комиссия по большим плотинам (СНГБ); г. Париж, Франция;

²Институт Гидропроект; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние 10–20 лет многие каменно-насыпные плотины с железобетонными экранами высотой 140–200 м (Мохале в Лесото, Тяньшэнцзяо, Зипингу в Китае и др.) имели проблемы с растрескиванием плит экрана и раскрытием периметральных швов. Большинство плотин построено в высокосейсмичных регионах, что вызывает сомнение в их сейсмостойкости при воздействии максимального расчетного землетрясения интенсивностью 8–9 баллов. Цель исследования — проверка сейсмостойкости некоторых плотин численными расчетами, выявление их поведения при расчетном сейсмическом (динамическом) воздействии, включая повреждение экрана, раскрытие его швов, отслаивание экрана от подэкрановой зоны и т.п.

Материалы и методы. Приведен анализ достоверности и применимости численных методов расчета сейсмостойкости данных плотин. Инциденты показали необходимость тщательной оценки и анализа каждого аспекта нового проекта при экстраполяции его из прецедента.

Результаты. Анализ поведения плотин при первом наполнении водохранилища продемонстрировал, что трещинообразование и повреждение экрана происходит в его верхней части. На большей глубине воды следует ожидать локальных повреждений швов экрана вследствие сжатия и сдвига, раскрытия вертикальных швов экрана, чрезмерной сжимаемости низовых зон камня, приводящих к протечкам через экран. Даны рекомендации по динамическому расчету рассмотренных плотин: по границам расчетной области; условиям прохождения или поглощения сейсмических волн по контактам экрана с переходной зоной и между его плитами; реальные и синтетические акселерограммы прикладывают к нижней границе расчетной области; выбор явного или неявного вычислительного метода, от которого зависит требуемый шаг решения и он должен быть согласован с шагом оцифровки акселерограмм.

Выводы. При проектировании высоких плотин в сейсмоопасных регионах следует использовать, кроме проверенных мировой практикой мер по повышению их статической и сейсмической безопасности, новый эффективный метод повышения их безопасности путем резкого снижения прогибов экрана с помощью опорной зоны из укатанного бетона вместо подэкрановой гравийной переходной зоны на примере плотины Камбаратинская-1 высотой 275 м в Кыргызстане и плотины Согамосо высотой 190 м в Колумбии (обе плотины расположены в сейсмичных регионах). Приведен успешный опыт Китая в проектировании и строительстве подобных плотин высотой 220–250 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каменно-насыпные плотины, железобетонные экраны, трещинообразование в экране, численные расчеты, сейсмическое воздействие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ляпичев Ю.П. Численные расчеты, проектирование и поведение каменно-насыпных плотин с железобетонными экранами при сейсмических воздействиях // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 569–584. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.569-584

Numerical analysis, design and behavior of rockfill dams with reinforced concrete faces during seismic actions

Yury P. Lyapichev^{1,2}

¹International Commission on Large Dams (ICOLD); Paris, France;

²Hydroproject Institute; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Over the last 10–20 years many rockfill dams with reinforced concrete faces that are 140–200 m high (Mohale in Lesotho, Tian Sheng Yao, Zipingpu in China, etc.) have experienced serious problems, including face slab cracking and perimeter joint opening. Most of these dams were built in high seismic hazard areas, and their seismic resistance to the maximal earthquake exposure, having the magnitude equal to 8–9, raises doubts. The goal of this research is to employ numerical methods to verify the seismic resistance of dams, to project their behavior in case of the seismic exposure that may damage the dam face, cause the face joints to open and the dam face to detach from its toe, etc.

Materials and methods. The author offers his analysis of reliability and applicability of numerical methods to the seismic resistance of dams. Incidents have demonstrated the need for a thorough assessment and analysis of each aspect of a new project whenever it is extrapolated from the precedent.

Results. The analysis of the dam behavior in the course of the first reservoir filling has demonstrated face top cracking that causes its damage. Deeper in the water, face joints may be exposed to localized damages due to compression and shear; one should expect vertical face joints to open; excessive compressibility of the downstream rockfill zone may cause the water to leak through the dam face. The author offers recommendations for the performance of the dynamic analysis of dams in respect of the boundaries of the computational domain, given that seismic waves are transmitted or absorbed at the interface between the dam face and the transition zone, on the one hand, and between dam slabs, on the other hand. In furtherance of his recommendations, real and synthetic accelerograms are applied to the bottom boundary of the computational domain; the choice of an explicit or implicit computational method should be made; the author's method pre-sets the intermediate solution which is to comply with the accelerogram digitization pattern.

Conclusions. In addition to internationally established measures for improving the static and seismic safety of dams, the author proposes a new effective dam safety improvement method to be used in the course of designing high dams to be constructed in high seismic hazard areas. This method improves dam safety by drastically reducing face deflections with the help of a support zone made of roller compacted concrete instead of the gravel transition zone, as exemplified by the 275 m high Kambaratinskaya-1 dam in Kyrgyzstan and the 192 m high Sogamoso dam in Colombia (both dams are located in highly seismic regions). The information on China's successful track record in designing and building similar dams, which are 220–250 m high, is also provided.

KEYWORDS: rockfill dams, reinforced concrete faces, concrete face cracking, numerical analysis, seismic forces

FOR CITATION: Lyapichev Yu.P. Numerical analysis, design and behavior of rockfill dams with reinforced concrete faces during seismic actions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):569-584. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.569-584 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В 2018 г. в мире построено более 600 каменно-насыпных плотин (КНП) с железобетонными экранами (ЖБЭ). В конце 2013 г. их было 325 высотой свыше 30 м в Китае и 16 плотин высотой более 200 м во всем мире, из которых 10 — в Китае. Плотина Шуйбуй в Китае высотой 233 м возведена в 2008 г. и сейчас является самой высокой в мире. Во время эксплуатации ряда этих плотин высотой 140–200 м (Мохале в Лесото, Тяньшэнцзяо, Зипингпу в Китае и др.) возникли серьезные проблемы: растрескивание плит экрана, раскрытие периметрального и вертикальных швов, отделение экрана от подэкранового слоя, что привело к опасной фильтрации и высокой стоимости ремонта [1–3]. Большинство данных плотин было построено в сейсмоактивных регионах, что вызывает сомнение в их сейсмостойкости при воздействии максимального расчетного землетрясения интенсивностью 8–9 баллов.

Цель настоящего исследования — проверка сейсмостойкости рассматриваемых плотин с помощью численных расчетов, выявление их поведения при расчетном сейсмическом (динамическом) воздействии, включая повреждение экрана, раскрытие его швов, отслаивание экрана от подэкрановой зоны и т.п.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПОВЕДЕНИЕ КНП С ЖБЭ

Численные расчеты КНП с ЖБЭ

Численные расчеты этих плотин отличаются от расчетов КНП с глинистыми ядрами или асфальто-

бетонными диафрагмами, поскольку ЖБЭ без трещин водонепроницаем и воспринимает гидростатическое давление, вызывая высокие сжимающие нагрузки в грунтах в нижней части переходных зон. Поэтому устойчивость верхового откоса КНП часто не проверяется не только в статических и сейсмических расчетах при полном водохранилище, но и при глубокой его сработке, что недопустимо. Поскольку верхняя часть верхового откоса (обычно с заложением 1,4–1,5) с подэкрановой переходной зоной не подвержена высокому гидростатическому давлению, она более чувствительна к максимальному сейсмическому ускорению в верхней части плотины, чем более пологий низовой откос (обычно с заложением 1,6–1,7) с каменной насыпью с большей прочностью на сдвиг.

До недавнего времени считалось необязательным проведение численного расчета КНП с ЖБЭ, и компании, заинтересованные в строительстве этих плотин, утверждали, что их проект был результатом только опыта и эмпирического подхода [4]. Ряд инцидентов затронул несколько недавних высоких КНП с ЖБЭ, что повысило интерес к численным моделям для сохранения контроля над экстраполяцией на более высокие плотины. Так, показано, что не только напряжения растут пропорционально высоте плотины, но и ее устойчивость. Форма долины была определена в качестве важного фактора, который вызывает перемещения каменной насыпи от берега к берегу и очень высокие сжимающие напряжения в ЖБЭ.

Эти проблемы сложны для численных расчетов, так как:

1. Проблема в целом трехмерная (3D).
2. Реакция каменной насыпи на нагрузки требует нелинейных определяющих законов с довольно

большими смещениями, включая скольжения вдоль скальных примыканий.

3. Контраст между деформируемой каменной насыпью и тонким ЖБЭ создает численные проблемы, поскольку скольжение может происходить по контакту двух материалов.

На рис. 1 приведен пример модельной сетки с объемными конечными элементами КНП с ЖБЭ Мохале высотой 145 м в Лесото. В случае скального основания его можно исключить из модели из-за очень низкой сжимаемости по сравнению с остальной частью модели.

В этом контексте для 10 рабочего Семинара Ко-

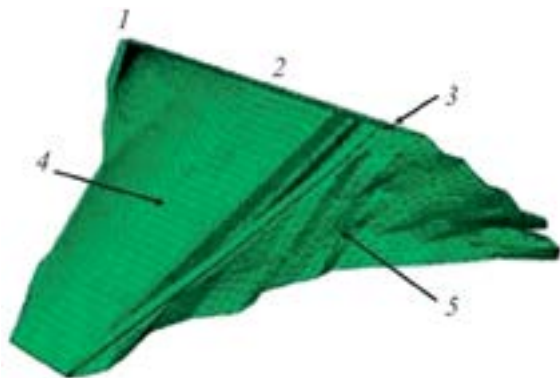


Рис. 1. Конечный элемент 3D-модели КНП с ЖБЭ: 1 — левый конец плотины; 2 — гребень; 3 — правый конец гребня; 4 — ЖБЭ; 5 — форма скального основания

Fig. 1. A finite element of a 3D model of a rockfill dam having a reinforced concrete face: 1 — left side of the dam; 2 — dam crest; 3 — right edge of the crest; 4 — reinforced concrete face; 5 — outline of the dam's rock base

митета СИГБ по проектированию больших плотин была предложена Задача 10В «Расчет КНП с ЖБЭ, включая нагрузки и деформации ЖБЭ», основанная на информации о КНП с ЖБЭ Мохале, в которой появились трещины в ЖБЭ. Были представлены 4 решения с результатами по перемещениям и напряжениям в каменной насыпи во время строительства и раскрытиям швов в ЖБЭ. Напряжения, соответствующие повреждениям, наблюдаемым в прототипе, получены в двух решениях. Главной причиной повреждений стала высокая сжимаемость каменной насыпи при высоких нагрузках вследствие дробления частиц камня [5].

За последние 20 лет многие КНП с ЖБЭ высотой 140–200 м (Мохале в Лесото, Агуамильпа в Мексике, Тяньшэньцзяо, Зипингпу, Жушукьяо в Китае и др.) имели серьезные проблемы с большим растрескиванием плит ЖБЭ и раскрытием периметральных швов, что привело к опасной фильтрации и последующей высокой стоимости ремонта [6]. Например, в плотине Жушукьяо высотой 156 м при напоре 78 м протечки достигли 2500 л/с, что по-

требовало опорожнения водохранилища и дорогого ремонта. Следует подчеркнуть, что недавние инциденты показали необходимость тщательной оценки и анализа каждого аспекта проекта при экстраполяции его из прецедента. Это должно быть основано на глубокой инженерной оценке и дополнено детальным численным анализом.

Поведение ЖБЭ КНП при первом наполнении водохранилища

Гидростатическое давление воды сжимает ЖБЭ и подстилающие его переходные зоны. Таким образом, сопротивление сдвигу против скольжения ЖБЭ по этим зонам также растет с повышением давления воды. В то же время давление воды предотвращает отделение ЖБЭ от грунта подстилающей его переходной зоны. Трещинообразование и повреждение ЖБЭ, скорее всего, ожидается в его верхней части. На большей глубине воды следует ожидать локальных повреждений швов ЖБЭ вследствие сжатия и сдвига, а также раскрытия вертикальных швов, приводящих к росту протечек через ЖБЭ [7].

До недавнего времени тенденция в проектировании ЖБЭ, основанная на интуиции специалистов, заключалась в большей осторожности на размещение камня ниже плит ЖБЭ и в меньшей осторожности в низовой части плотины (большая толщина слоев, более низкое качество камня и т.д.). В некоторых плотинах появилось много повреждений в плитах ЖБЭ и большие протечки вследствие чрезмерной и неравномерной деформации каменных зон.

Точные модели с нелинейными свойствами каменной насыпи показали неблагоприятное влияние чрезмерной сжимаемости низовой призмы на деформации в ЖБЭ [8]. Влияние значительного уплаживания низового откоса также было приведено в качестве доказательства. По-прежнему трудно получить реальные свойства камня в лабораторных испытаниях из-за размера конечных элементов и образцов. Сейчас проводятся исследования, чтобы понять явление пластификации в масштабе блока, цель которого — получение закона экстраполяции, чтобы описать поведение крупного камня из более управляемых его лабораторных образцов только с небольшими блоками [9, 10].

Одной из трудностей, связанных с нелинейным процессом в численных расчетах с помощью метода конечных элементов (МКЭ), является необходимость проверки процесса сходимости. В программном обеспечении (ПО) обычно используется только глобальный критерий сходимости, основанный на доле неуравновешенной энергии по отношению к общей энергии деформации. Этот критерий не работает в ряде особых случаев, например, при раскрытии швов в ЖБЭ. Причина в том, что небольшая неуравновешенная локальная сила может пре-

дотратить разрушение целой структуры (эффект «застежки-молнии») [11]. Только специалист может обнаружить такие критические случаи, и поэтому необходимо, чтобы все ПО имели инструменты для обнаружения (и визуализации) количества локальных неуравновешенных сил на разных этапах численного расчета.

Общая сейсмическая устойчивость КНП с ЖБЭ

Для этих плотин применяются следующие модели разрушения при сейсмовоздействиях:

- 1) скольжение мелких материалов по плоским поверхностям;
- 2) клинообразное разрушение или разрушение при глубокой поверхности вращения [4];
- 3) уязвимость периметральных швов [2], так как шов (защищенный фильтрами) является критическим элементом и вынос грунта должен быть предотвращен в случае протечки;

4) трещинообразование ЖБЭ вследствие высокой сжимаемости верхних переходных зон. Применение в этих зонах хорошо отсортированного и плотного мелкого и крупного грунта с низкой сжимаемостью, и их уплотнение может минимизировать трещинообразование ЖБЭ;

5) длительные осадки хорошо уплотненной каменной насыпи в диапазоне 0,1–0,2 % от высоты плотины. Сильное встряхивание при землетрясении основания плотины может привести к его осадкам в диапазоне около 0,5–1,0 м.

Для оценки сейсмического поведения ЖБЭ следует провести расчет воздействия компоненты землетрясения, направленной поперек каньона с тем, чтобы получить реальные значения динамических напряжений в ЖБЭ и его реакцию на эти воздействия. Поведение жесткого ЖБЭ при его движениях в плоскости очень отличается от поведения каменной насыпи, и, таким образом, движение каменной насыпи к гребню будет сдерживаться ЖБЭ. Поэтому при вибрации поперек каньона жесткий ЖБЭ воспринимает сейсмические воздействия от плотины,

что приводит к очень высоким напряжениям в ЖБЭ. Разрушение при сдвиге и/или растрескивание бетона может произойти в сильно напряженных швах.

Анализ повреждений КНП с ЖБЭ Зипингпу (Китай) при мощном землетрясении

В мае 2008 г. серьезные повреждения и интенсивное трещинообразование ЖБЭ были зарегистрированы в Китае на плотине Зипингпу (рис. 2) высотой 156 м, которая была запроектирована на воздействие пикового ускорения основания в 0,26 g [1].

Как видно на рис. 2, материалы плотины (сплошные линии) были отсыпаны до отметки 810 м на первом этапе строительства, до отметки 850 м на втором и 884 м на третьем этапе (пунктиры). Плиты ЖБЭ также бетонировались в 3 этапа. После отсыпки материалов плотины до проектных отметок первого и второго этапов плиты ЖБЭ забетонированы на отметках немного ниже гребня плотины. После завершения третьего этапа плиты были забетонированы на отметке 879,4 м, чтобы соединить их со стенкой парапета. Поэтому два слоя строительных швов имеются в плитах ЖБЭ на отметках 796 и 845 м. Эти строительные горизонтальные швы оказались уязвимы к смещениям при мощном (магнитуда 8.0) землетрясении в Вэньчуань 12 мая 2008 г., от эпицентра которого плотина находилась в 17 км.

Сейсмическая интенсивность на участке плотины в диапазоне 9–10 баллов (китайская сейсмическая шкала) была выше значения, принятого в проекте. Во время землетрясения уровень водохранилища был низким, что стало основной причиной повреждения гребня плотины и трещинообразования ЖБЭ. На гребне замеренные пиковые ускорения превысили 2 g, однако, поскольку поведение бетонных плит и стенки парапета гребня сильно отличалось от поведения насыпи плотины, то бетонные плиты отделились от каменной насыпи плотины, образовав раскрытие (разрыв) в 15–20 см. После землетрясения максимальная осадка на гребне плотины составила 75 см, горизонтальное низовое перемещение — 180 см. Деформация обоих берего-

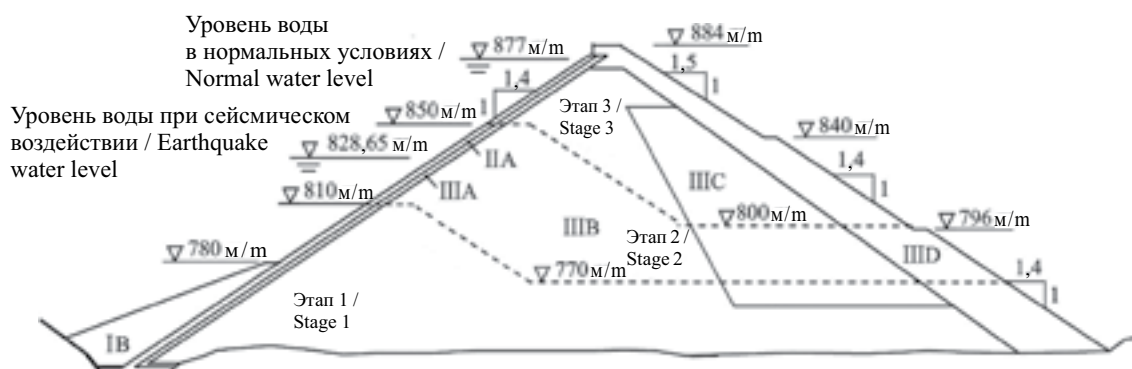


Рис. 2. Типовой поперечный разрез плотины Зипингпу с ЖБЭ

Fig. 2. Typical cross-section of Zipingpu CFRD

вых примыканий поперек каньона составила 10 см. Вследствие низкого уровня водохранилища при землетрясении трудно оценить, какое поведение плотин, ЖБЭ и гидроизоляционной системы было бы, если водохранилище было наполнено.

Хотя плотина и запроектирована на воздействие землетрясения с сейсмической интенсивностью 8,0, а пиковое ускорение скального основания с вероятностью превышения 0,02 за 100 лет составило $259,6 \text{ см/с}^2$, плотина выдержала землетрясение Вэнчуань, которое имело сейсмическую интенсивность выше 9,0 и пиковое ускорение основания выше 5 м/с^2 .

Замеренные и незамеренные реакции плотины при землетрясении способствовали численным исследованиям сейсмического напряженно-деформированного (НДС) состояния плотины.

Разрушение при сдвиге строительных швов на отметке 845 м было неблагоприятным следствием распространения раскрытия контакта под плитами ЖБЭ. Результаты численных расчетов показывают, что плиты отделялись от материала подэкрановой зоны постепенно во время землетрясения, и поверхность этого раскрытия имела особый контакт. То есть потенциальная зона раскрытия над отметкой 845 м еще сохраняла контакт, в то время как раскрытие контакта выше этой зоны от сейсмотолчков уже произошло, как показано на рис. 3.

В этих условиях бетонные плиты работали как консольные плиты, которые имели тенденцию поворота около верхней части контактной области под совместным действием гравитационных и сейсмических инерционных сил (рис. 3). Такой поворот приводит к резкому снижению нормального сжимающего напряжения или даже к росту нормального растягивающего напряжения в горизонтальных швах и снижению прочности на сдвиг швов.

Выводы по сейсмостойкости плотины Зипингпу

Плотина Зипингпу является единственной высокой плотиной этого типа, которая когда-либо испытала сильнейшее землетрясение с пиковым ускорением основания около $0,5 \text{ g}$. Данный редкий

и ценный случай дает богатые данные для исследования и проверки сейсмостойкости плотин с ЖБЭ, с тем чтобы иметь руководство по проектированию и строительству высоких плотин с ЖБЭ в регионах с высокой интенсивностью землетрясений. В этом исследовании был выполнен динамический расчет реакции плотины с помощью МКЭ и использованием вязкоупругой модели для материалов каменной насыпи. Постоянная деформация плотины также изучена с помощью эмпирических формул накопленных деформаций, установленных для материалов каменной насыпи. Следующие выводы можно получить на основе численных результатов и полевых наблюдений:

1. Явное усиление сейсмоколебаний наблюдалось при численном расчете плотины как в продольном (вдоль реки) горизонтальном направлении, так и по вертикали. Возбуждение колебаний не усиливалось в нижней половине плотины. Однако коэффициенты усиления колебаний быстро росли в верхней половине плотины, и коэффициенты горизонтального и вертикального усиления колебаний на гребне плотины достигли, соответственно, 2,2 и 2,4.

Установлено большее ускорение колебаний у откосов плотины, чем по оси плотины. Эти реакции ускорения объясняют разрыхление, качку и падение камней у гребня и по низовому откосу, наблюдаемых при полевых исследованиях после землетрясения.

2. Сейсмические толчки привели к значительной осадке плотины, которая сильно росла по высоте плотины. Это соответствовало опытным данным о том, что образец скальной породы обычно подвергается сокращению объема во время циклического сдвига. Опасным последствием землетрясения, вызывающего осадку плотины, является отделение дорожного покрытия на гребне плотины и плит ЖБЭ от просевших материалов каменной насыпи, что наблюдалось на плотине. В данном исследовании постоянная деформация плотины и соответствующих областей разделения между плитами ЖБЭ



Рис. 3. Механизм разрушения при сдвиге горизонтальных строительных швов: строительные швы на отм. 845 м; зона контакта; область, уязвимая к трещинам; зона раскрытия

Fig. 3. Mechanism of shear failure of horizontal construction joints: construction joints (el. 845 m); contact area; area vulnerable to cracks; joint opening area

и подэкрановой зоны, воспроизводимыми с помощью моделирования конечными элементами, согласуется с полевыми наблюдениями, что доказывает эффективность применения метода потенциальной деформации и соответствующей модели постоянных деформаций.

3. Перед отделением бетонных плит от основных материалов каменной насыпи плиты работают, как плиты на скальном основании. Однако распространение разрыва вдоль разделения между бетонными плитами и материалом подэкрановой зоны изменяет рабочее состояние плит ЖБЭ в консольные плиты, которые поворачиваются по неразделенной области под совместным действием гравитационных и сейсмических инерционных сил. Этот эффект приводит к резкому снижению нормального сжимающего напряжения или даже к значительному растягивающему напряжению вдоль горизонтальной плоскости бетонных плит и вызывает разрушение строительных швов.

4. Поскольку повреждение плит ЖБЭ — результат осадки плотины, одним из самых важных аспектов, который следует учитывать при строительстве этих плотин в сейсмоопасных регионах, может быть снижение постоянной сейсмодоформации. Рост плотности материалов каменной насыпи путем повышения критериев их уплотнения, особенно для этих материалов в верхней половине плотины, представляется рациональным.

5. Что касается метода расчета сейсмической реакции плотины, то результаты, полученные в рассматриваемом примере, показывают, что эквивалентный линейный метод, включающий вязкоупругую модель для реакции ускорения, а также метод потенциальной деформации для расчета постоянной деформации, весьма полезны в изучении динамического поведения этих плотин. Однако важно отметить, что предположение, допущенное в расчете, заключается в разложении полных деформаций каменных материалов плотины на циклическую (вязкоупругую) и постоянную (пластичную) части. Такое упрощение делает прогноз напряжений внутри плит ЖБЭ ненадежным, поскольку на напряжения бетонных плит влияют полные смещения нижележащих каменных материалов плотины. По этой причине невозможно дать количественное объяснение разрушению строительных швов плит ЖБЭ.

6. Для того чтобы достоверно предсказать историю напряжений плит ЖБЭ в данных плотинах, следует иметь определяющую модель, которая может описать гистерезис (рассеивание энергии) и постоянное накопление деформаций в единой модели. Однако таких видов применимых моделей пока нет, хотя в последние десятилетия в этой области уже предприняты значительные усилия использования

различных видов продвинутых определяющих моделей. Определяющее моделирование динамического поведения каменных материалов таких плотин остается сложной задачей, которая требует дальнейших исследований.

Общие рекомендации по динамическому расчету КНП с ЖБЭ

Трехмерная 3D динамическая реакция системы «плотина – основание – водохранилище» влияет на значения раскрытия швов ЖБЭ, состояние контакта плотины с примыканиями, поведение контрольной галереи и общую картину полей перемещений и напряжений.

1. Границы расчетной области основания плотины назначают из условия их достаточной удаленности так, чтобы их влияние на поведение плотины не было значительным. Обоснование длины основания плотины в динамической задаче осложняется необходимостью исключить возможность отражения волны от границ расчетной области [11, 12]. Современные программы, такие как FLAC, ADINA и Abaqus, позволяют на границах выбранной расчетной области применять условия прохождения или поглощения сейсмических волн.

2. Степень достоверности результатов динамических расчетов сильно зависит от достоверности расчетных условий на контактах элементов системы. На контактах ЖБЭ с переходной зоной и между плитами ЖБЭ следует ставить односторонние связи (контакт работает только на сжатие) с учетом трения между ЖБЭ и переходными зонами. Программы FLAC, ADINA и Abaqus позволяют реализовать эти условия.

3. Важным вопросом является выбор моделей материалов системы «плотина – основание». Современные компьютеры и ПО позволяют реализовывать в расчетах разные модели материалов плотины: для бетона — упругие модели, для грунтов — нелинейно-упругие, упруго-пластичные, пластичные и т.д. Однако существуют большие трудности в выборе обоснованных параметров материалов системы при динамических воздействиях.

4. В динамическом расчете НДС системы от статических нагрузок (гидростатическое давление верхнего бьефа (ВБ) и собственный вес плотины и ЖБЭ) следует рассматривать как начальное поле напряжений (перемещения нулевые).

5. В расчете плотины динамическим методом рекомендуется прикладывать сейсмическую нагрузку (реальные и синтетические акселерограммы) к нижней границе расчетной области основания. Допустимо прикладывать сейсмическую нагрузку непосредственно на подошву плотины, если в расчетных акселерограммах уже учтено влияние на них плотины.

6. Современное ПО позволяет учитывать в динамическом расчете потерю системой энергии из-за внутреннего трения, вводя в уравнения движения коэффициенты затухания.

7. При полной формулировке задачи (с учетом контактной и материальной нелинейности системы, с включением в расчетную схему области основания) требуется решение методом прямого пошагового интегрирования.

8. В статических расчетах необходимо, чтобы размеры конечных элементов (КЭ) были выбраны так, чтобы в зонах изменений знаков напряжений было бы не меньше чем 5 КЭ.

9. В сейсморасчетах размеры КЭ должны быть не более $1/5$ длины кратчайшей волны.

10. Исследователь должен выбрать, если программа позволяет, вычислительный метод (явный или неявный), от которого зависит требуемый шаг решения для его устойчивости или точности. Причем этот шаг решения должен быть согласован с шагом оцифровки акселерограмм. В результате исследований, проведенных при разных проектных параметрах материалов системы, исследователь должен получить всю необходимую информацию для обоснования конструкции плотины и ЖБЭ. При наличии полной информации разработка конструкции плотины является уже проблемой инженерного опыта в подобных плотинах.

Проектные рекомендации по сейсмической безопасности высоких КНП с ЖБЭ

При проектировании высоких КНП с ЖБЭ в высокосейсмичных районах рекомендованы следующие основные меры по улучшению их сейсмической безопасности и поведения:

- уположивание низового откоса в верхней части плотины (примерно $0,2 H$) для уменьшения ее сейсмических деформаций сдвига;
- достаточное превышение гребня плотины над нормальным уровнем водохранилища (с учетом осадки гребня и высоты гравитационных волн в водохранилище);
- широкий гребень (улучшает безопасность гребневой части плотины и повышает ее сопротивление против перелива от гравитационных волн);
- применение геосеток и других методов укрепления обоих откосов у гребня плотины;
- правильный выбор материалов плотины и их зонирования в теле плотины: хорошо уплотненный гравий или щебень в верховых переходных зонах и галька в центральной части плотины для уменьшения их сжимаемости и прогиба ЖБЭ при наполнении водохранилища, отсыпка твердого камня на низовом откосе с максимальными углами внутреннего трения при сейсмических нагрузках;

- в гравийной насыпи плотины должна быть предусмотрена верховая дренажная зона с горизонтальной частью крупного гравия, защищенного фильтрами, чтобы обеспечить свободное дренирование воды, просочившейся через трещины ЖБЭ, и дальнейшее дренирование воды через гравийную насыпь без ее суффозии;

- новый эффективный метод снижения (до 50–55 %) прогиба ЖБЭ с помощью зоны тощего укатанного бетона (УБ) вместо верховой переходной зоны. Этот метод был предложен в проекте КНП с ЖБЭ Камбарата-1 высотой 275 м в Кыргызстане и подобной плотины Согамосо ($H = 190$ м) в Колумбии (см. ниже);

- предусмотрение донных водовыпусков для сработки водохранилища при повреждении ЖБЭ или водонепроницаемой системы;

- плиты ЖБЭ с меньшей шириной для снижения их неравномерных деформаций вблизи крутых береговых примыканий;

- расположение арматуры ЖБЭ для повышения его несущей способности в плоскости и вне плоскости и его упругости;

- организация надлежащей системы швов, включая горизонтальные швы, и выбор ширины шва с учетом обратимого характера сейсмической реакции;

- водонепроницаемая система плит ЖБЭ и периметрального шва для учета статических и сейсмических перемещений шва.

Новые конструкции высоких КНП с ЖБЭ

Многие высокие (свыше 100 м) КНП с ЖБЭ имеют серьезные проблемы с интенсивным трещинообразованием ЖБЭ и большими раскрытиями швов, что приводит к опасной фильтрации воды и последующему дорогостоящему ремонту¹ [13–16]. Новый эффективный метод предотвращения или смягчения этих проблем был предложен для КНП с ЖБЭ Камбаратинская-1 высотой 275 м в Кыргызстане и подобной плотины Согамосо $H = 190$ м в Колумбии, обе плотины расположены в сейсмоопасных регионах.

КНП с ЖБЭ Камбаратинская-1 (вариант проекта, $H = 275$ м, Кыргызстан (рис. 4)

Плотина была запроектирована в СССР как каменно-набросная, построенная путем направленного взрыва скальных берегов плотины. В настоящее время существует острая необходимость в независимой международной экспертизе проекта плотины вследствие ее сложных экологических и технологических проблем, которые включают непредсказуемые последствия большого взрыва скальных берегов плотины.

¹ ICOLD Bulletin 141. Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction. 2010. P. 408.

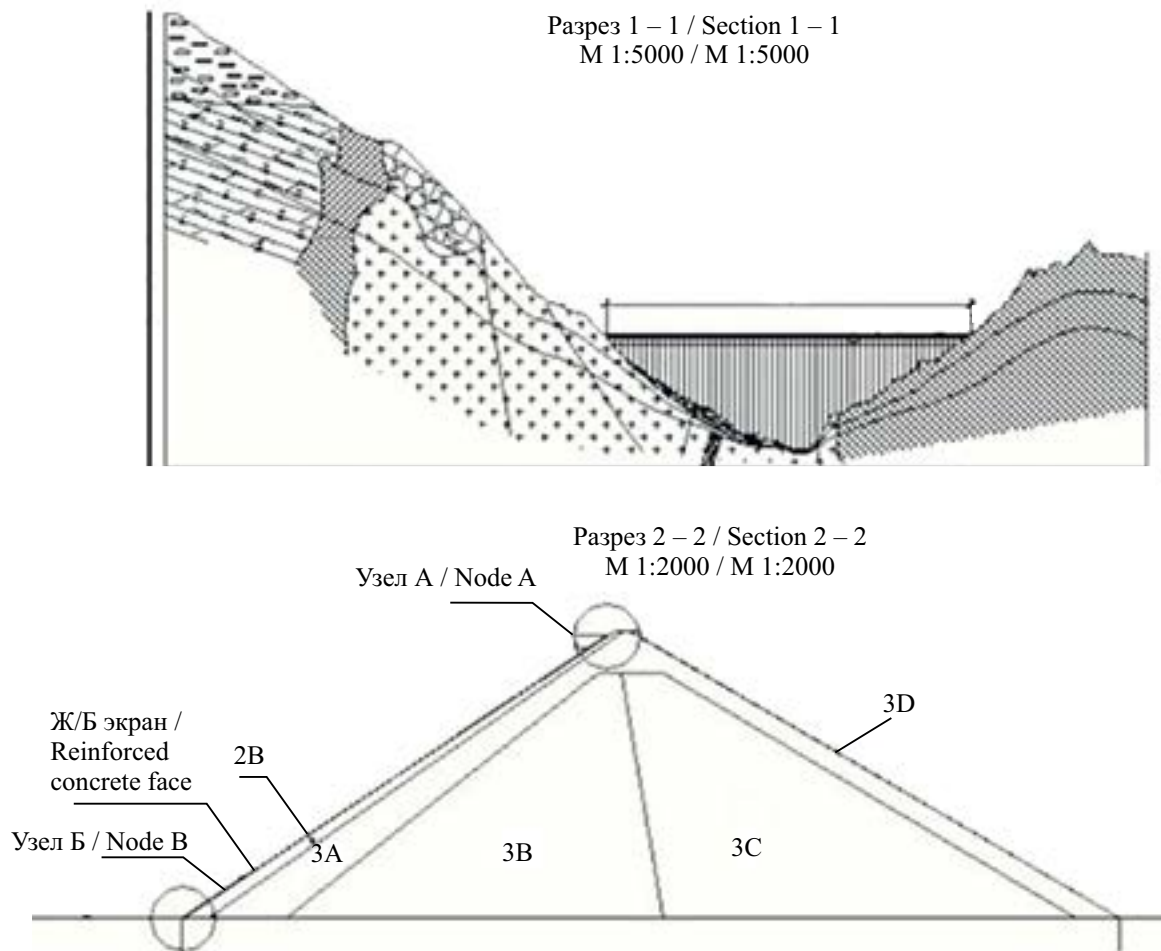


Рис. 4. Продольное сечение и поперечный разрез КНП с ЖБЭ Камбаратинская-1 ($H = 275$ м)

Fig. 4. Longitudinal section and cross-section of Kambaratinskaya-1 CFRD ($H = 275$ m)

С учетом этих проблем автором статьи разработан новый вариант проекта КНП с ЖБЭ высотой 275 м с проверенной на месте строительства технологией ее возведения. Так как высота плотины на 40 м больше высоты (235 м) самой высокой в мире подобной плотины Шубуя в Китае и она расположена в сейсмоопасном регионе (9 баллов по шкале MSK-64), была разработана специальная мера по сокращению прогибов ЖБЭ (нормального к ЖБЭ) — верховая переходная гравийная зона толщиной

3 м сверху и 6 м внизу заменяется тощим УБ с низкой сжимаемостью.

Численный расчет (при плоской деформации 2D) НДС по программе ADINA с упруго-пластичной моделью Мора – Кулона и зоной УБ с различными схемами строительства плотины и наполнения водохранилища показал, что максимальный прогиб ЖБЭ можно снизить вдвое по сравнению с обычным вариантом верховой гравийной зоны, что значительно повысит безопасность пло-

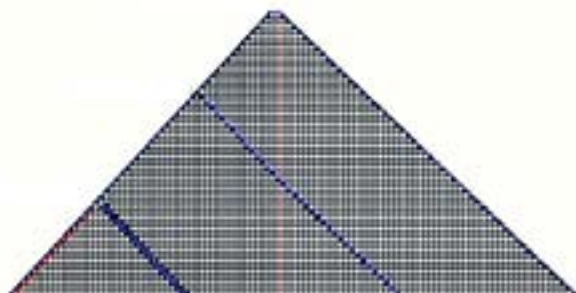


Рис. 5. Сетка КЭ для трех этапов строительства
Fig. 5. F.E. mesh for 3 stages of construction

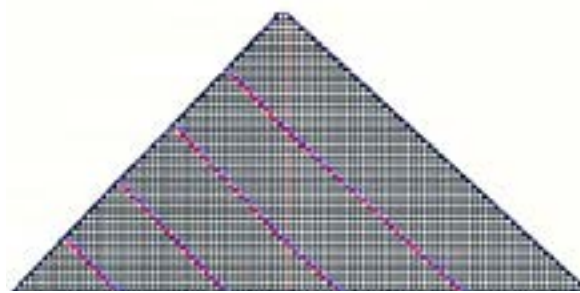


Рис. 6. Сетка КЭ для пяти этапов строительства
Fig. 6. F.E. mesh for 5 stages of construction

тины (рис. 5, 6). Обжатый профиль плотины и высокая скорость ее строительства обеспечат большие технологические, экономические и экологические преимущества этого варианта по сравнению со старым проектом взрывонабросной плотины.

А. Результаты статического расчета НДС КНП с ЖБЭ Камбаратинская-1 ($H = 275$ м) с верховой подэкрановой переходной зоной 2В.

Результаты 2D статического анализа при пяти этапах строительства плотины (рис. 7–10) показали, что вертикальные сжимающие напряжения равномерно распределены по высоте плотины, достигая 6 МПа в напорной пяте плотины. В верховой переходной гравийной зоне под ЖБЭ наблюдается концентрация сжимающих напряжений от 0,6 до 2,6 МПа.

В. Результаты 2D статического расчета НДС КНП с ЖБЭ Камбаратинская-1 ($H = 275$ м) с верховой опорной зоной из тощего УБ (рис. 11–14).

Эффективность снижения прогиба ЖБЭ Камбаратинская-1 с помощью зоны УБ

Снижение прогиба ЖБЭ с помощью опорной зоны из тощего УБ является эффективным: максимальный прогиб ЖБЭ составляет всего 50 см или в 2,4 раза меньше, чем прогиб ЖБЭ с гравийной переходной зоной. Вариант КНП Камбаратинская-1 с тощим УБ в качестве опорной зоны для ЖБЭ обеспечивает большое сокращение стоимости и сроков строительства плотины по сравнению с КНП взрывного типа. Таким образом, этот вариант должен быть рассмотрен, как один из основных в окончательном проекте.

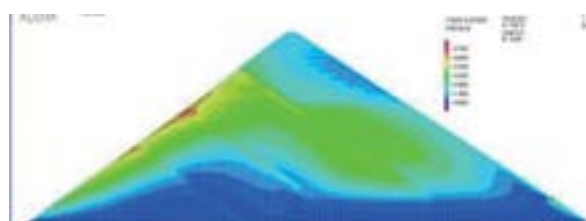


Рис. 7. Горизонтальные перемещения, м
Fig. 7. Horizontal displacements, m

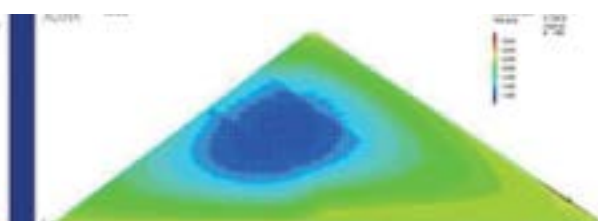


Рис. 8. Вертикальные перемещения, м
Fig. 8. Vertical displacements, m

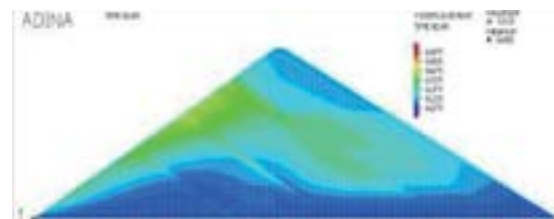


Рис. 9. Горизонтальные напряжения, МПа
Fig. 9. Horizontal stresses, MPa

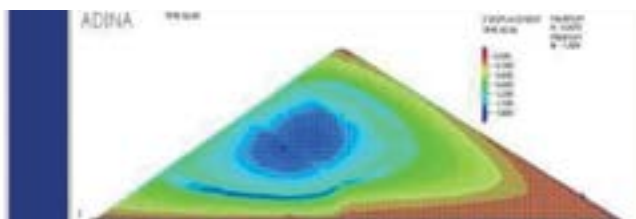


Рис. 10. Вертикальные напряжения, МПа
Fig. 10. Vertical stresses, MPa



Рис. 11. Горизонтальные перемещения, м
Fig. 11. Horizontal displacements, m

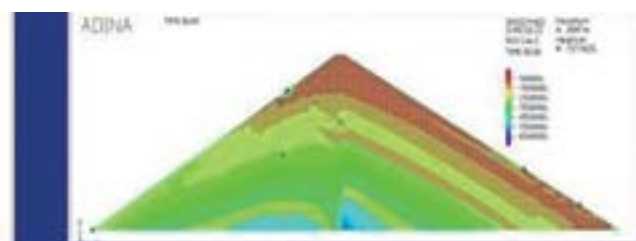


Рис. 12. Вертикальные перемещения, м
Fig. 12. Vertical displacements, m



Рис. 13. Горизонтальные напряжения, МПа
Fig. 13. Horizontal stresses, MPa

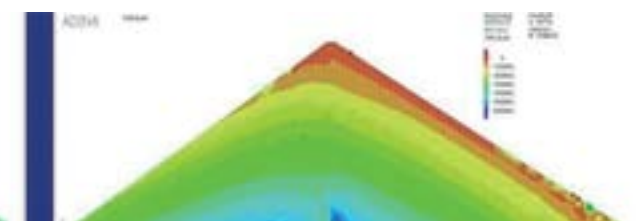


Рис. 14. Вертикальные напряжения, МПа
Fig. 14. Vertical stresses, MPa

КНП с ЖБЭ Согамоса $H = 190$ м (Колумбия, построена) на скальном основании

Расчет НДС плотины (плоская задача 2D) выполнен с помощью программы ADINA с использованием упругопластической модели с критерием Мора – Кулона (табл. 1). Было получено большое влияние поэтапности строительства плотины и наполнения водохранилища на НДС плотины (рис. 15–18).

Для этой плотины автором статьи разработан новый эффективный метод снижения на 40–55 % прогиба экрана путем включения опорной зоны УБ толщиной 6–3 м вместо верховой подэкрановой переходной зоны гравия 2В (рис. 15).

Эффективность снижения прогиба ЖБЭ плотины Согамоса с помощью опорной зоны УБ

1. При пяти этапах строительства плотины и наполнения водохранилища максимальный прогиб ЖБЭ с основной 2В переходной гравийной зоной (3–6 м в ширину) может достигать 180 см.

2. В случае замены переходной зоны 2В на УБ шириной 3–6 м максимальный прогиб ЖБЭ соста-

вит всего 95 см, что значительно повысит трещиностойкость экрана.

Последние достижения в проектировании и строительстве КНП с ЖБЭ $H = 200–250$ м

Стандарты контроля безопасности и методы оценки

На основе анализа исследований плотин высотой порядка 200 м, построенных в Китае и других странах, в сочетании с исследованиями по последним 4 проектам в Китае: Гушуй, Румей, Сихаксия и Меджи можно сформулировать ключевые принципы контроля безопасности этих высоких плотин, охватывающие меры по контролю наводнений, сейсмическому критерию, превышению гребня плотины над уровнем ВБ, деформациям плотины, деформациям и напряжениям плиты экрана, деформациям швов, устойчивости откосов плотины, фильтрации в плотине и др., с тем, чтобы обеспечить основу для оценки безопасности и контроля плотин высотой 250–300 м.

Зонирование материалов и профиля плотины

Табл. 1. Проектные параметры Мора – Кулона упругопластической модели материалов плотины

Table 1. Design parameters of Mohr – Coulomb elastoplastic model for dam materials

Параметр / Parameter	Зона 3А / Zone 3A	Зона 2В (УБ) / Zone 2B (RCC)	Перемычка (УБ) / Cofferdam (RCC)	Зона 3Д / Zone 3D	Зона 3В / Zone 3B	Зона 3С / Zone 3C
Модуль деформации, МПа / Deformation modulus, MPa	50	5000	5000	20	40	30
Коэффициент Пуассона / Poisson Coefficient	0,3	0,2	0,2	0,33	0,32	0,33
Плотность сухого грунта, т/м ³ / Dry density of soil, t/m ³	2,0	2,35	2,35	1,93	2,04	1,83
Угол внутреннего трения φ° / Angle of inner friction φ°	42	40	40	35	44	35
Сцепление, МПа / Cohesion, MPa	—	0,1	0,1	—	—	—

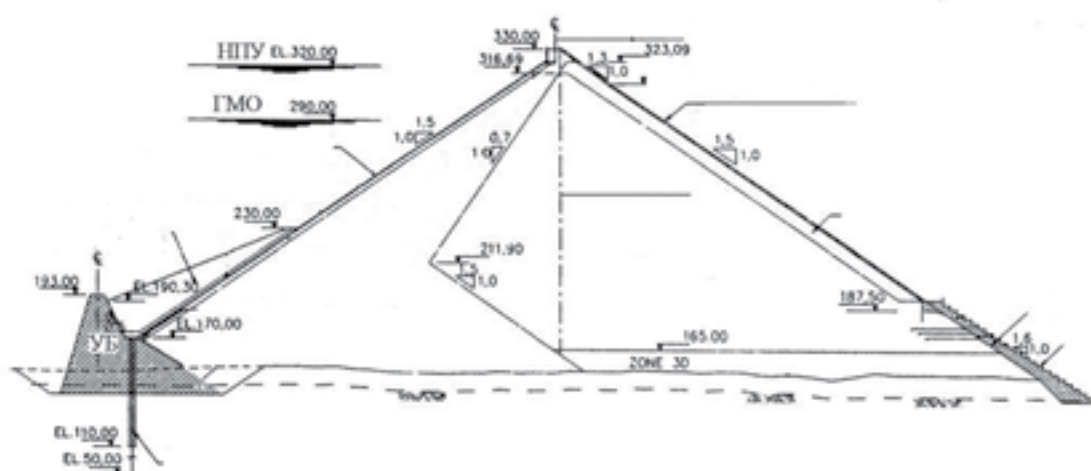


Рис. 15. Поперечный разрез КНП Согамоса ($H = 190$ м) с верховой перемычкой из УБ ($h = 36$ м)

Fig. 15. Cross-section of Sogamoso CFRD (190 m) with upstream RCC coffer-dam ($h = 36$ m)

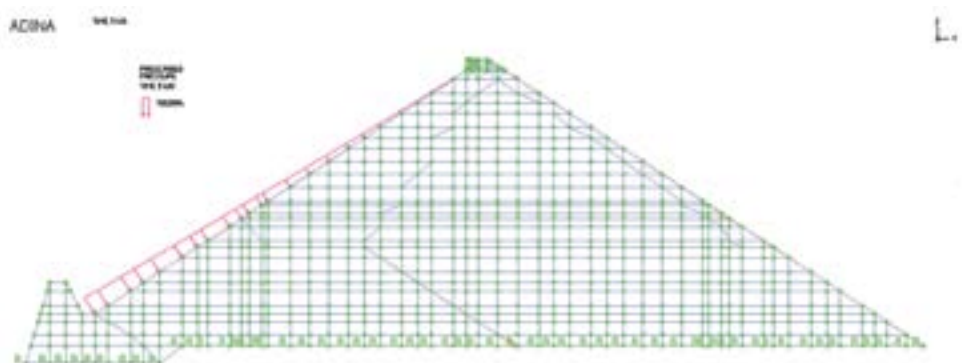


Рис. 16. Сетка 846 КЭ в статическом расчете НДС плотины

Fig. 16. Finite element mesh (846 elements) in static dam analysis of stress-strain state

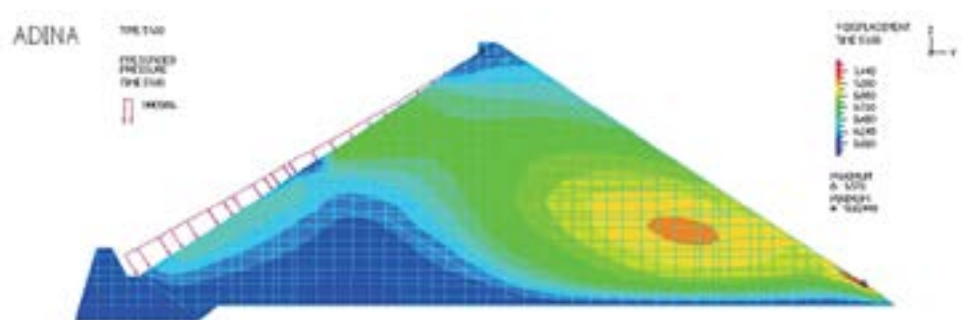


Рис. 17. Горизонтальные смещения, м, плотины с опорной зоной из УБ под ЖБЭ

Fig. 17. Horizontal displacements, m, in dam with RCC support zone under concrete face

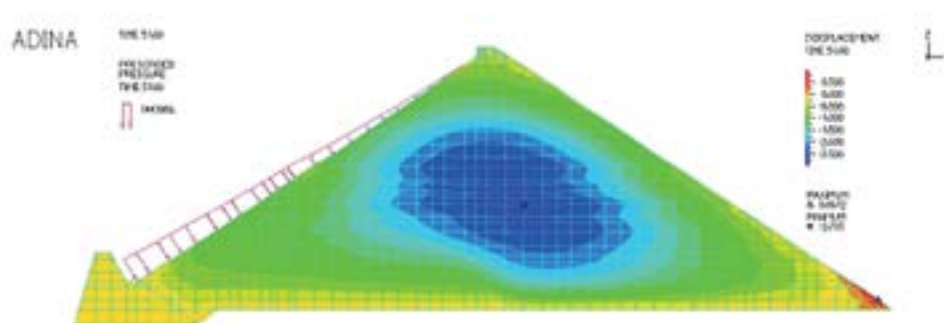


Рис. 18. Вертикальные смещения, м, плотины с опорной зоной из УБ под ЖБЭ

Fig. 18. Vertical displacements, m, in dam with RCC support zone under concrete face

Высота упомянутых проектируемых четырех высоких плотин (Гушуй, Румей, Сихаксия и Меджи) колеблется от 240 до 315 м. В проектах используются средне- и высокопрочные камни (или песчаный гравий) с хорошим грансоставом, которые уплотняются до высокой плотности. Рекомендуемый диапазон наклонов откосов плотины 1:1,4–1:1,7 — более пологий, чем у плотин высотой 200 м. С учетом специальных условий строительства каждой плотины предлагаются высокие требования по уплотнению каменной насыпи в плотине высотой 300 м. Пористость камня насыпи должна быть 17–20 %, а относительная плотность песчано-гравийных материалов — 0,95–0,98. Пористость верховых и низо-

вых зон камня должна составить 18 % для плотины Гушуй, 19 % для Румей и 19–20 % для Меджи. По сравнению с плотинами высотой 200 м требования по уплотнению этих четырех высоких плотин, как правило, увеличиваются. Если взять, как пример, плотину Гушуй, типичное зонирование материалов этой плотины показано на рис. 19.

Технология испытаний материалов плотины

Для дальнейшего снижения масштабных эффектов в лабораторных испытаниях Китайский институт водных ресурсов и гидроэнергетики (IWHR) и некоторые другие научно-исследовательские институты разрабатывают установку трехосного сжатия с вертикальной нагрузкой 1500 т, что позволит

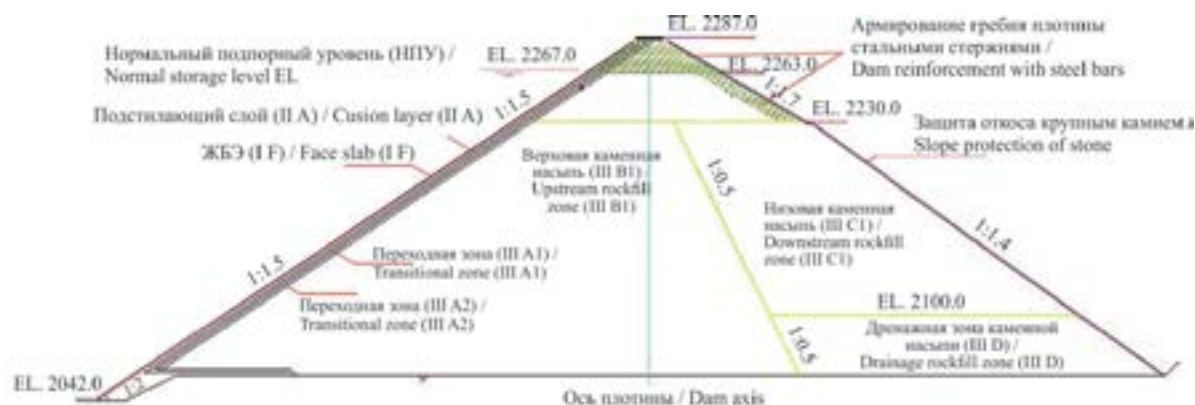


Рис. 19. Профиль зонирования материалов плотины Гушуй (отметки в м)

Fig. 19. Material zoning profile of the Gushui CFRD (unit: m)

увеличить диаметр опытного образца с 300 до 1000 мм, тем самым заложив основу для будущих исследований масштабных эффектов.

Недавно исследования [17] представили два механизма, связанных с размером мезоскопических механизмов, для описания дробления частиц камня в насыпи. Один из них заключается в том, что крупные частицы камня легко дробятся, в результате чего параметры модуля деформаций крупных образцов меньше, чем у мелких образцов; другой заключается в том, что блокировка (зацепление) крупных частиц камня сильнее, чем у мелких частиц, в результате чего параметры модуля деформаций крупных образцов превышают параметры мелких образцов. Эти два механизма существуют и действуют альтернативно. Структура зоны камня подвержена всестороннему давлению вследствие вибрационного уплотнения, собственного веса и гидростатической нагрузки. При относительно низком всестороннем давлении блокировка (зацепление) частиц камня (эффект скелета) поддерживает устойчивость структуры; когда всестороннее давление превышает предельную несущую способность структуры каменной насыпи, частицы камня дробятся и структура изменяется и превращается в новое устойчивое состояние. Эти два действия повторяются альтернативно до тех пор, пока структура каменной насыпи не достигнет устойчивого состояния равновесия. В данном процессе контраст между блокировкой и дроблением частиц камня определяет масштабные эффекты.

Для современных высоких плотин дробление частиц камня неизбежно произойдет в процессе его уплотнения при применении тяжелых виброкатков. Во время строительства и наполнения ВБ происходит вторичное дробление частиц камня под совместным действием собственного веса каменной насыпи и гидростатической нагрузки и размягчением камня, в результате его смачивания еще больше усилится дробление камня, а затем увеличится

деформация плотины. Таким образом, эффект дробления частиц камня в целом сильнее, чем эффект скелета. В настоящее время из-за ограниченного размера образцов при лабораторных трехосных испытаниях возникают трудности с воспроизведением реального рабочего состояния каменных материалов в высоких плотинах. Это объясняет, почему замеренные деформации высоких плотин превышают расчетные значения и почему фактические параметры деформаций каменных материалов в высоких плотинах ниже, чем те, которые получены в ходе лабораторных трехосных испытаний.

Изучение закономерностей деформации — напряжения сверхвысоких КНП с ЖБЭ

Анализ с помощью вычислительных моделей показывает, что деформация насыпи и плиты экрана удваивается, когда высота плотины возрастает с 200 до 300 м и напряжения в каменной насыпи и плите экрана также сильно возрастают [18].

Недавние исследования показали, что макроскопическим фактором разрушения плиты экрана вдоль вертикальных швов в высоких плотинах является чрезмерная деформация каменной насыпи, а прямой причиной служит поступательное сжатие и вращательное выдавливание плит экрана вдоль вертикального шва [18] (рис. 20), локальная стрела прогиба плиты лица — причина разрушения плиты экрана вблизи горизонтальных швов.

Последние результаты показывают, что, поскольку материалы подэкрановой зоны, переходных и каменных зон — гранулированные материалы, их механическое поведение имеет явные прерывистые и анизотропные характеристики; поэтому их деформация может быть разделена на две части: макроскопическую и мезоскопическую деформации. Макроскопическая деформация — деформация по шкале плотины может быть оценена с помощью определяющих моделей, описывающих макроскопическое механическое поведение. Мезоскопическая деформация — деформация по шкале частиц

требует для ее описания мезоскопических механических моделей. Неравномерная сила контакта между плитой экрана, подэкрановой и переходными зонами является одним из факторов локального компрессионного повреждения плиты экрана, в то время как распределение размера частиц и толщина подэкрановой и переходных зон влияют на локальное напряженное состояние в плите экрана. Мезоскопический процесс передачи силы от плиты экрана через подэкрановую зону на переходную зону смоделирован с помощью метода дискретного элемента, было установлено, что неоднородность контактной силы падает с ростом толщины подэкрановой и переходных зон [19]. За пример можно взять плотину Гушуй, где минимальные толщины подэкрановой и переходных зон свыше 2 и 4 м, а неравномерный коэффициент контактной силы между плитой экрана и подэкрановой зоной стремится к сходимости.

Фильтрационная устойчивость и контроль фильтрации

Как вторая защитная линия системы контроля фильтрации плотины, принцип проекта подэкрановой зоны заключается в том, что разрушение плотины от фильтрации не произойдет, даже если плита экрана полностью разрушена. Коэффициент фильтрации порядка 10^{-4} см/с рекомендуется для материалов подэкрановой зоны, используемых в плотинах высотой 300 м. На основе экспериментальных исследований распределение грансостава материалов подэкрановой зоны предложено в виде: $d_{\max} = 40\text{--}100$ мм, содержание мелких частиц $d < 5$ мм должно быть 35–50 %, содержание мелких частиц $d < 1$ мм должно быть 20–32 % и $d_{20} = 0,35\text{--}1$ мм. Учитывая однородность качества строительства, деформацию плотины и допустимый гидравлический градиент, горизонтальная ширина подэкрановой зоны в плотине высотой 300 м должна быть не менее 5 м. Переходная зона должна служить фильтром к подэкрановой зоне и запроектирована согласно критериям фильтра.

Антисейсмические инженерные мероприятия

Предложено принять ряд всесторонних мер по повышению сейсмостойкости плотины, таких, как разработка достаточно сложной компоновки сооружений, выбор прочного основания плотины и плотных строительных материалов плотины, резервирование превышения гребня плотины над нормальным подпорным уровнем (НПУ), уположивание откосов плотины в ее верхней части, армирование откосов в их верхней части, установка каркаса из бетонных балок и укрепление плиты экрана и герметизирующей структуры. Для плотины Гушуй приняты такие меры, как уположивание верхней части низового откоса и укрепление гребня плотины стальными

стержнями (рис. 20). Недавно Даляньский технологический университет предложил способ по снятию динамических напряжений плиты экрана при землетрясении путем размещения местных постоянных горизонтальных швов, как показано на рис. 21. Удобная и эффективная область для размещения горизонтальных швов была определена посредством расчета реакции динамических напряжений в плите экрана [20]. Рекомендуемая область $(0,75\text{--}0,85) H$ (где H — максимальная высота плотины) на отметке с допустимым расширением $0,05 H$ и горизонтальной длиной $0,3 L$ (где L — длина плотины по ее оси). Предлагается также использовать бетон с добавлением стального волокна в зонах высокого динамического напряжения в плите экрана для повышения его трещиностойкости при землетрясении.

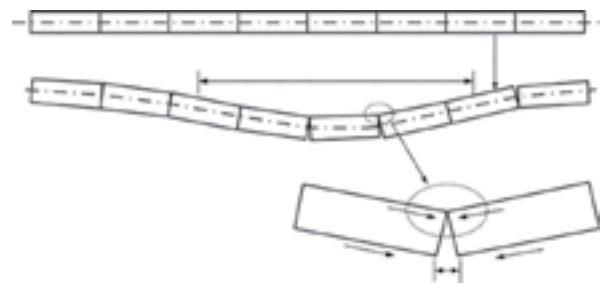


Рис. 20. Схема поступательного сжатия и вращательного выдавливания плит экрана

Fig. 20. Scheme of translational compression and rotational extrusion of face slabs

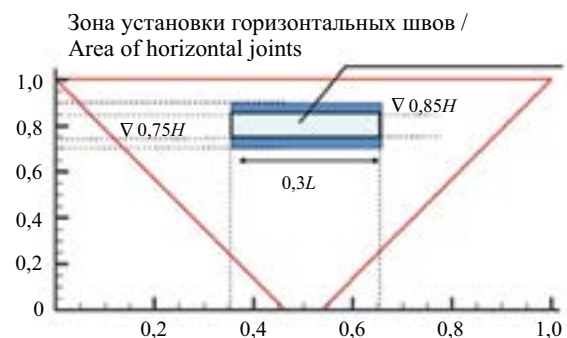


Рис. 21. Схема размещения постоянных горизонтальных швов

Fig. 21. Schematic diagram of placement of permanent horizontal joints

Краткие выводы по опыту Китая в строительстве сверхвысоких плотин с ЖБЭ

За 20 лет Китай приобрел успешный опыт в проектировании и строительстве плотин высотой 200–250 м. Недавно там проведены детальные исследования по применимости и ключевым технологиям строительства таких плотин высотой 250–300 м. Были получены ценные результаты, которые демон-

стрируют безопасность этих плотин в сейсмоопасных регионах и эффективность принятых конструктивно-технологических решений.

Последующие исследования будут сосредоточены на определяющих моделях каменной насыпи и масштабных эффектах, расчетах напряжений и деформаций плотины на основе мезомеханики, механизме передачи неравномерной деформации в подэкрановой и переходных зонах, механизме выдавливания плиты экрана и мерах его контроля, крупномасштабных технологиях испытаний материалов и практических инструментах мониторинга безопасности подобных плотин. По мере прогресса предварительных исследований по проектам плотин Гушуй и Сихаксия технология строительства этих плотин в Китае успешно выходит в диапазон высот 250–300 м.

ВЫВОДЫ

При проектировании высоких КНП в сейсмоопасных регионах целесообразно рассматривать новый метод значительного снижения прогибов ЖБЭ с помощью опорной зоны из УБ вместо подэкра-

новой гравийной переходной зоны, как показали примеры плотины Камбаратинская-1 высотой 275 м в Кыргызстане и плотины Согамосо высотой 190 м в Колумбии.

При проектировании и строительстве высоких КНП с ЖБЭ в сейсмоопасных регионах следует использовать успешный опыт Китая в проектировании и строительстве плотин высотой 250–300 м.

Согласно перспективному плану развития гидроэнергетики России до 2020 г. главными регионами строительства новых ГЭС и плотин являются Северный Кавказ, Сибирь и Дальний Восток [21]. Природные условия для строительства КНП с ЖБЭ могут быть особенно пригодными на Северном Кавказе и в ряде стран СНГ (Таджикистане и Кыргызстане). Относительно строительства этих плотин в Сибири и на Дальнем Востоке могут возникнуть некоторые проблемы, в частности, в поведении ЖБЭ в его верхней гребневой части при воздействии экстремально низких температур. Однако успешный опыт строительства таких плотин в Норвегии и Исландии указывает на возможность решения данных проблем и хорошие перспективы строительства подобных плотин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xu Z. Performance of Zipingpu CFRD during the strong earthquake // Proceedings of 10th Intern Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Xian, China, June 30 to July 4, 2008. Pp. 481–496.
2. Wieland M., Brenner R.P. Earthquake aspects of concrete faced rockfill dams, diaphragm walls and grout curtains // Int. Journal Water Power and Dam Construction, April. 2007. Pp. 42–51.
3. Chen S., Fu Z., Han H. Seismic responses of high concrete face rockfill dams: A case study // Water Science and Engineering. 2016. Vol. 9. Issue 3. Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.wse.2016.09.002
4. Seed H.B., Seed R.B., Lai S.S., Khamenehpour B. Seismic design of concrete faced rockfill dams. CFRDs — Design, Construction and Performance, American Society of Civil Engineers, N-Y, 1985. Pp. 459–478.
5. Anthinianc P., Carrere A., Develay D. The contribution of numerical analysis to the design of CFRD // Hydropower and Dams. 2002. Vol. 9. Issue 4.
6. Coyne et Bellier. Proceedings of the 10th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. Gennevilliers, France, 2009.
7. Wieland M. Safety Aspects of Sustainable Storage Dams and Earthquake Safety of Existing Dams // Engineering. 2016. Vol. 2. Issue 3. Pp. 325–331. DOI: 10.1016/j.eng.2016.03.011
8. Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features // Proceedings of the 3rd Symposium on CFRDs. 2007. Oct. 25–27; Florianopolis, Brazil, 2007. Pp. 3–16.
9. Hunter G., Fell R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. No. 10. Pp. 909–917. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(909)
10. Dakoulas P. Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2012. Vol. 34. Issue 1. Pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.09.004
11. Carrere A., Lyapichev Yu., Mazza G., Popovici A., Zenz G. Guidelines for use of numerical models in dam engineering // ICOLD Bulletin 155. 2013. 150 p.
12. Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. Finite Dynamic Model for Infinite Media // Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE. 1969. Vol. 95. No. EM4.
13. Lysmer J., Waas G. Shear Waves in Plane Infinite Structures // Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE. 1972. Vol. 98. No. EM.
14. Marulanda A., Pinto N. Recent experience on design, construction and performance of CFRD dams // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. August, 2008. P. 9.

URL: <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2949&context=icchg>

15. Ляпичев Ю.П. Проектирование и строительство современных высоких плотин. Гл. 7, 8. Palmarium Academic Publishing, 2013. 370 с.

16. Freitas M.S. Concepts on CFRDs leakage control — cases and current experiences // ISSMGE Bulletin. 2009. Vol. 3 (4). Pp. 11–18.

17. Wen L., Chai J., Xu Z. Statistical review of the behaviour of concrete face rockfill dams based on case histories // Géotechnique. 2018. Vol. 68. No. 9. Pp. 749–771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095

18. Deng G., Wang X. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage

of face slab of CFRDs // Journal of Hydraulic Engineering. 2015. Vol. 46. No. 4. Pp. 396–404. (in Chinese).

19. Ma H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete face rockfill dam. Science in China // Series Engineering: Technological Sciences. 2014. Vol. 50. No. S1. Pp. 20–33. (in Chinese).

20. Deng G., Wang X., Wen Y., Yu S., Chen R. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage of face slab of concrete faced rockfill dam // Journ. Hydraulic Eng. 2015. Vol. 46. Issue 4. Pp. 396–404.

21. Лащенков С.Я., Саакян В.А., Салимов Ю.Т. Программа достройки ГЭС. Основные положения прогноза развития гидроэнергетики до 2015 г. // Гидротехническое строительство. 2001. № 11. С. 13–21.

Поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 4 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: **Юрий Петрович Ляпичев** — член **Международной Комиссии по большим плотинам (СИГБ)**; Франция, 75016, г. Париж, Авеню Клебер, 61; доктор технических наук, профессор, внештатный консультант и эксперт по зарубежным проектам; **Институт Гидропроект**, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; ORCID: 0000-0003-3750-3165; lyapichev@mail.ru.

REFERENCES

1. Xu Z. Performance of Zipingpu CFRD during the strong earthquake. *Proceedings of 10th Intern. Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xian, China, June 30 to July 4, 2008; 481–496.

2. Wieland M., Brenner R.P. Earthquake aspects of concrete faced rockfill dams, diaphragm walls and grout curtains. *Int. Journal Water Power and Dam Construction*, April. 2007; 42–51.

3. Chen S., Fu Z., Han H. Seismic responses of high concrete face rockfill dams: A case study. *Water Science and Engineering*. 2016; 9(3):195–204. DOI: 10.1016/j.wse.2016.09.002

4. Seed H.B., Seed R.B., Lai S.S., Khamenehpour B. *Seismic design of concrete faced rockfill dams*. CFRDs — Design, Construction and Performance, American Society of Civil Engineers, N-Y, 1985; 459–478.

5. Anthinanc P., Carrere A., Develay D. The contribution of numerical analysis to the design of CFRD. *Hydropower and Dams*. 2002; 9(4).

6. Coyne et Bellier. *Proceedings of the 10th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*. Genn-evilliers, France, 2009.

7. Wieland M. Safety Aspects of Sustainable Storage Dams and Earth-quake Safety of Existing Dams. *Engineering*. 2016; 2(3):325–331. DOI: 10.1016/j.eng.2016.03.011

8. Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features. *Proceedings of the 3rd Symposium on CFRDs*. 2007. Oct. 25–27. Florianopolis, Brazil, 2007; 3–16.

9. Hunter G., Fell R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003; 129:10:909–917. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(909)

10. Dakoulas P. Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012; 34(1): 11–24. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.09.004

11. Carrere A., Lyapichev Yu., Mazza G., Popovici A., Zenz G. Guide-lines for use of numerical models in dam engineering. *ICOLD Bulletin 155*. 2013; 150.

12. Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE. 1969; 95(EM4).

13. Lysmer J., Waas G. Shear Waves in Plane Infinite Structures. *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE. 1972; 98(EM).

14. Marulanda A., Pinto N. Recent experience on design, construction and performance of CFRD dams. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. August, 2008; 9. URL: <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2949&context=icchg>

15. Lyapichev Yu., P. *Design and Construction of Modern High Dams* (Chapters 7, 8). Palmarium Academic Publishing, 2013; 370. (rus.).
16. Freitas M.S. Concepts on CFRDs leakage control — cases and current experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009; 3(4):11-18.
17. Wen L., Chai J., Xu Z. Statistical review of the behaviour of concrete face rockfill dams based on case histories. *Géotechnique*. 2018; 68:9:749-771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095
18. Deng G., Wang X. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage of face slab of CFRDs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2015; 46(4): 396-404. (in Chinese).
19. Ma H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete face rockfill dam. *Science in China. Series Engineering: Technological Sciences*. 2014; 50 S1:20-33 (in Chinese).
20. Deng G., Wang X., Wen Y., Yu S., Chen R. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage of face slab of concrete faced rockfill dam. *Journ. Hydraulic Eng.* 2015; 46(4):396-404.
21. Laschenov S.Ya., Saakyan V.A., Salimov Yu.T. Program of completion of hydropower plants (in Russian) *Fundamentals of hydropower plants forecast up to 2015. Hydrotechnical construction*. 2001; 11: 13-21. (rus.).

Received February 10, 2020.

Adopted in a revised form on March 4, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

BIONOTES: **Yury P. Lyapichev** — member of the **International Commission on Large Dams (ICOLD)**; 61 Avenue Kleber, Paris, 75016, France; Doctor of Technical Sciences, Professor, freelance consultant and expert for foreign project; **Hydroproject Institute**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3750-3165; lyapichev@mail.ru.

Расчет теплового режима помещения при автоматическом регулировании климатических систем

О.Д. Самарин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. До сих пор представляется актуальным продолжение исследований в области расчета теплового режима помещений в условиях автоматизации систем обеспечения микроклимата с целью получения зависимостей, которые являются достаточно точными и учитывающими большинство существенных для задачи факторов, но в то же время имеющими инженерный вид. Цель работы — поиск зависимости температуры помещений здания от времени при скачкообразном изменении теплоступлений для пропорционального закона регулирования теплового потока от климатических систем. В качестве научной гипотезы рассматривается положение об экспоненциальном характере данной зависимости.

Материалы и методы. Используются и проанализированы основные уравнения, связывающие наиболее важные составляющие теплового потока в помещении, обслуживаемом автоматизированными климатическими системами, в условиях скачкообразного изменения. Реализована численная модель нестационарного теплового режима вентилируемого помещения на основе решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности и теплообмена на поверхностях помещения. Получено и аналитически решено общее уравнение теплового баланса помещения в дифференциальной форме с учетом обратной связи, вносимой регулятором.

Результаты. Найдено аналитическое выражение для скорости нагрева помещения при пропорциональном регулировании климатического оборудования в условиях скачка теплоступлений, имеющее вид экспоненциальной функции от корня квадратного из времени с момента скачка. Рассчитан характер изменения температуры в помещении при наличии и отсутствии регулирования на примере одного из существующих жилых зданий в климатических условиях г. Москвы.

Выводы. Показано, что на скорость изменения температуры в помещении при скачкообразном тепловом воздействии влияет главным образом соотношение коэффициента передачи регулятора и теплоинерционности «массивных» ограждающих конструкций. Отмечено, что упрощенное аналитическое решение хорошо подтверждается результатами расчетов по численной модели. Выявлено, что предельное значение приращения температуры воздуха помещения определяется отношением величины теплоступлений и параметра, пропорционального коэффициенту передачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, температура, тепловой баланс, температурная волна, теплоступления, регулирование, коэффициент передачи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Расчет теплового режима помещения при автоматическом регулировании климатических систем // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 585–591. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.585-591

The calculation of the thermal mode of a room with automatic regulation of climate systems

Oleg D. Samarin

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

ABSTRACT

Introduction. The ongoing research of the indoor temperature, regulated by automatically operating climate systems, remains relevant if focused on identification of dependencies which are sufficiently accurate with regard for the majority of essential factors and represented in the engineering format. The mission of the research is to identify a dependency between indoor temperature and time in case of irregular heat supply in the context of prorated heat flow regulation by indoor climate systems. The exponential nature of this dependency serves as the research hypothesis.

Materials and methods. The author has employed and analyzed the principal equations connecting the most important constituents of a heat flow in a room that has automated climate systems in the context of discontinuous changes. The author has employed a computational model of a non-steady temperature environment of a ventilated room. The proposed model is

based on the solution of a system of differential equations describing heat conductivity and transfer on indoor surfaces. The author has composed and analytically solved the general differential equation describing the indoor thermal balance with regard for the climate system's feedback.

Results. The author has developed an analytical expression describing the indoor space heating rate in case of prorated temperature regulation by the climate system and irregular heat supply. The analytical expression represents an exponential function of the square root of the time span starting from the moment of a heat supply spike. The author used a residential house in Moscow to analyze the nature of indoor temperature fluctuations with and without heat regulation.

Conclusions. The author has proven that an indoor temperature rate is mainly driven by the relation between the transmission coefficient of a climate system and the thermal inertia of "massive" building envelopes in case of irregular thermal exposure. The author makes the point that a simplified analytical solution is proven true by the results of the analysis performed with the help of a numerical model. It's been identified that the ultimate value of an indoor temperature increment is determined as the relation between the heat gain value and the parameter which is proportionate to the transfer coefficient.

KEYWORDS: microclimate, temperature, heat balance, temperature wave, heat gain, regulation, transmission coefficient

FOR CITATION: Samarina O.D. The calculation of the thermal mode of a room with automatic regulation of climate systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):585-591. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.585-591 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Надежное поддержание совокупности параметров внутреннего микроклимата помещений в требуемых пределах, определяемых условиями комфортности для человека или необходимых для осуществления технологического процесса, является безусловной задачей функционирования инженерных систем здания и обслуживающих их систем автоматического регулирования и управления. Это связано, в первую очередь, с тем, что данные требования определяют безопасность жизнедеятельности и, следовательно, обязательны в соответствии с Федеральным законом № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Предмет исследования настоящей работы — способы расчета изменения температуры в помещениях зданий при появлении дополнительных теплоступлений с целью оценки качества функционирования автоматизированных климатических систем с точки зрения выполнения требований комфортности или безопасности технологических процессов. Цель исследования в этом контексте — выявление закономерности изменения температуры помещений здания с течением времени после возникновения теплоступлений.

Задача расчета изменения температуры в помещении, обслуживаемом автоматизированными системами обеспечения микроклимата, решалась исследователями как в нашей стране, так и за рубежом, с использованием различных подходов. В частности, фундаментальная работа [1] дает нам ряд аналитических решений, но они относятся, в первую очередь, либо к остыванию помещений при прекращении теплоснабжения, либо к случаю периодических тепловых возмущений. В последние годы в научной литературе можно видеть и более

комплексные разработки, например [2–4], но их результаты часто бывают несколько усложненными для непосредственного применения в инженерной практике. В то же время в настоящее время все большее внимание обращают на себя исследования, в основе которых лежит реализация численного моделирования для изучения переходных и аварийных режимов [5, 6], особенно такой подход характерен в зарубежных работах [7–9]. Одновременно имеется группа публикаций [10–18], где расчет остывания и вообще нестационарной теплопроводности материалов исследуется как аналитически, так и численно, но применительно не к помещению, а к обработке строительных материалов [10, 11], ограждающим конструкциям [12, 13], расчету энергопотребления зданий [14, 15] и другим технологическим процессам, например, производству композиционных материалов [16], а также подземных трубопроводов [17], и их результаты в определенной степени могут быть использованы при решении рассматриваемой задачи. Кроме того, авторы некоторых работ в данной области, напротив, решают обратную задачу — по определению теплофизических характеристик материала на базе исследования температурных колебаний [18].

Автором в статье [19] было представлено аналитическое решение задачи о понижении температуры внутреннего воздуха в аварийном режиме теплоснабжения с использованием уравнения теплового баланса для помещения в целом в дифференциальной форме. Однако представляют интерес и другие случаи, когда такое уравнение может быть проинтегрировано, особенно в условиях нормального функционирования климатического оборудования, оснащенного соответствующей системой автоматизации для поддержания внутренних метеопараметров в требуемых пределах. В монографии [20] рассма-

тривались некоторые подобные варианты, особенно для периодических колебаний теплоступлений, однако это было сделано с применением несколько иных подходов на основе комбинации теории теплоустойчивости и передаточных функций. Таким образом, продолжение исследований в данной области с целью получения зависимостей, которые являются достаточно точными и учитывающими большинство существенных для задачи факторов, но в то же время имеющими инженерный вид, представляется до сих пор актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выражение для расчета разогрева помещения в случае появления дополнительных возмущающих тепловых воздействий в виде теплоступлений, если помещение обслуживается автоматизированными климатическими системами, можно получить следующим образом. В данном случае общие теплоступления оказываются переменными, а следовательно, системы обеспечения микроклимата будут действовать в нестационарных условиях. Так как расчетное время регулирования с точки зрения непрерывного поддержания необходимой комфортности внутреннего микроклимата не должно быть очень большим, при этом можно учитывать только четыре основные составляющие теплового баланса помещения, а именно теплоступления от источников $Q_{\text{пост}}$, Вт, в общем случае переменные во времени, приток теплоты с приточным воздухом и его сток с вытяжным, а также тепловой поток через внутренние поверхности ограждающих конструкций. Для получения более наглядного результата используем постановку задачи в форме, аналогичной в работе [19].

Тогда, если считать для простоты все теплоступления конвективными, т.е. попадающими непосредственно в воздух помещения, уравнение баланса будет выглядеть так:

$$Q_{\text{пост}} + G_{\text{п}} c_{\text{в}} t_{\text{п}} / 3,6 - G_{\text{в}} c_{\text{в}} t_{\text{в}} / 3,6 - B \sqrt{\tau} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} = 0, \quad (1)$$

где τ — промежуток времени с момента начала рассмотрения процесса, с; $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{в}}$ — массовый расход приточного и вытяжного воздуха, кг/ч, причем практически всегда можно считать $G_{\text{п}} = G_{\text{в}}$, поскольку воздушный баланс помещения, в отличие от теплового, с очень большой точностью является мгновенно-стационарным; $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{в}}$ — соответственно температура притока и вытяжки, °С. В рамках однозонной модели разницей $t_{\text{в}}$ и температуры внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ обычно пренебрегают, поэтому далее будем полагать $t_{\text{в}} = t_{\text{в}}$ и получим уравнение только с одной неизвестной функцией $t_{\text{в}}(\tau)$. Величина $c_{\text{в}}$ представ-

ляет собой удельную теплоемкость воздуха, равную 1,005 кДж/(кг·К).

Параметр B в выражении (1) вычисляется следующим образом:

$$B = \Sigma \left[A_{\text{м}} \sqrt{\lambda c \rho} \right]_i, \quad (2)$$

где λ , c и ρ — это соответственно теплопроводность, Вт/(м·К), удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность материала слоя i -го массивного ограждения, обращенного внутрь помещения, в частности, наружной стены, внутренних стен и перегородок, а также межэтажных перекрытий; $A_{\text{м}}$ — площадь каждого из перечисленных ограждений, м². Так называемые «легкие» (безынерционные) конструкции, например, заполнения светопроемов, здесь не учитываются. Это можно сделать, поскольку в процессе автоматического регулирования отклонение $t_{\text{в}}$ от исходного значения обычно невелико, и поэтому мгновенные тепловые потоки через такие ограждения так же малы, особенно при небольших коэффициентах остекления.

Формулу для параметра B можно найти, если предположить, что в начальный период времени температурная волна, образующаяся при тепловом воздействии на помещение, успевает проникнуть только в рассматриваемый слой. При этом имеется в виду, что глубина проникновения данной волны составляет около $3,6\sqrt{a\tau}$, где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, м²/с — коэффициент температуропроводности материала, откуда, если принять температурное поле в пределах волны приближенно параболическим, и определяется числовой коэффициент в выражении для B , равный в данном случае единице [19].

В условиях автоматического поддержания $t_{\text{в}}$ по непрерывному пропорциональному закону за счет соответствующего регулирования величины $t_{\text{п}}$ можно записать дополнительное уравнение связи:

$$(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) = K_{\text{рег}} (t_{\text{в}} - t_{\text{в},0}). \quad (3)$$

В левой части выражения (3) находится именно разность $(t_{\text{п}} - t_{\text{в}})$, поскольку из уравнения (1) с приведенными далее оговорками она и определяет суммарный дополнительный тепловой поток, вносимый в помещение или удаляемый из него климатической системой в процессе обеспечения требуемого уровня $t_{\text{в}}$. Здесь $K_{\text{рег}}$ — безразмерный эквивалентный коэффициент передачи автоматизированной системы по каналу « $t_{\text{в}} \rightarrow t_{\text{п}}$ ».

Поскольку нас интересует в основном поведение отклонения текущего значения $t_{\text{в}}$ от его контролируемого уровня (уставки) $t_{\text{в},0}$, дальнейшие расчеты удобно вести для избыточной температуры $\theta_{\text{в}} = t_{\text{в}} - t_{\text{в},0}$. Тогда после некоторых преобразований

уравнение (1) можно записать в каноническом виде:

$$\frac{d\theta_b}{d\tau} - \frac{A}{B\sqrt{\tau}}\theta_b = \frac{Q_{\text{пост}}(\tau)}{B\sqrt{\tau}}. \quad (4)$$

Комплекс A здесь определяется по выражению:

$$A = G_{\text{п}} c_{\text{в}} K_{\text{рег}} / 3,6. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Видим, что выражение (4) представляет собой линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка, поэтому оно всегда интегрируется в квадратурах. В частном случае, когда $Q_{\text{пост}} = \text{const}$, т.е. при скачкообразном тепловом воздействии, преобразования можно довести до конца в элементарных функциях, в результате чего получаем:

$$\theta_b = \frac{Q_{\text{пост}}}{A} \left(1 - \exp \left[-\frac{2A}{B} \sqrt{\tau} \right] \right). \quad (6)$$

Таким образом, отклонение t_b от уставки с течением времени асимптотически приближается к максимальной величине, равной $Q_{\text{пост}}/A$, что совпадает с другими решениями в рассматриваемой области, например, когда помещение представляется в виде инерционного звена 1-го порядка, но характер данной зависимости получается несколько иным, а именно аргумент функции \exp оказывается пропорциональным величине $\sqrt{\tau}$, а не τ .

Следует обратить внимание, что при $A \rightarrow 0$, т.е. в случае отключения системы автоматизации, выражение (6) формально дает $\theta_b \rightarrow \infty$, что, на первый взгляд, лишено физического смысла. Но это связано с тем, что при записи исходного уравнения (1) пред-

полагалось, что помещение обслуживается исключительно автоматизированной приточно-вытяжной системой, и тогда прекращение работы регулятора означает и остановку подачи воздуха. Разумеется, тогда величина θ_b действительно будет неограниченно расти. Однако при малых τ , используя разложение функции \exp в ряд Тейлора, можно получить следующее выражение, в котором параметр A уже будет отсутствовать:

$$\theta_b = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} \sqrt{\tau}. \quad (7)$$

По форме это соответствует зависимости температуры от времени, полученной для естественного остывания здания, если в ней таким же образом перейти к пределу при $\tau \rightarrow 0$. Такое совпадение легко объяснить, ибо в начальный период времени, когда регулирующее воздействие еще не оказывает должного влияния на тепловой режим помещения, процесс его нагревания должен происходить так же, как и в отсутствие регулирования.

Для наглядности рассмотрим пример расчета изменения t_b по формуле (6) в помещении с параметрами $B = 12\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{К}$; $A = 100 \text{ Вт}/\text{К}$. При этом начальное значение $t_{b,0}$ было принято равным 20°C , уровень теплоступлений $Q_{\text{пост}} = 500 \text{ Вт}$, а величина B вычислена в соответствии с конструктивными характеристиками здания и геометрическими размерами помещения. Вместе с тем было учтено, что, если считать, что в соседних помещениях температурный режим является аналогичным, тогда значения B_i для внутренних ограждений (стен, перегородок, межэтажных перекрытий) следует брать в два раза меньше, чем это получается непосредственно

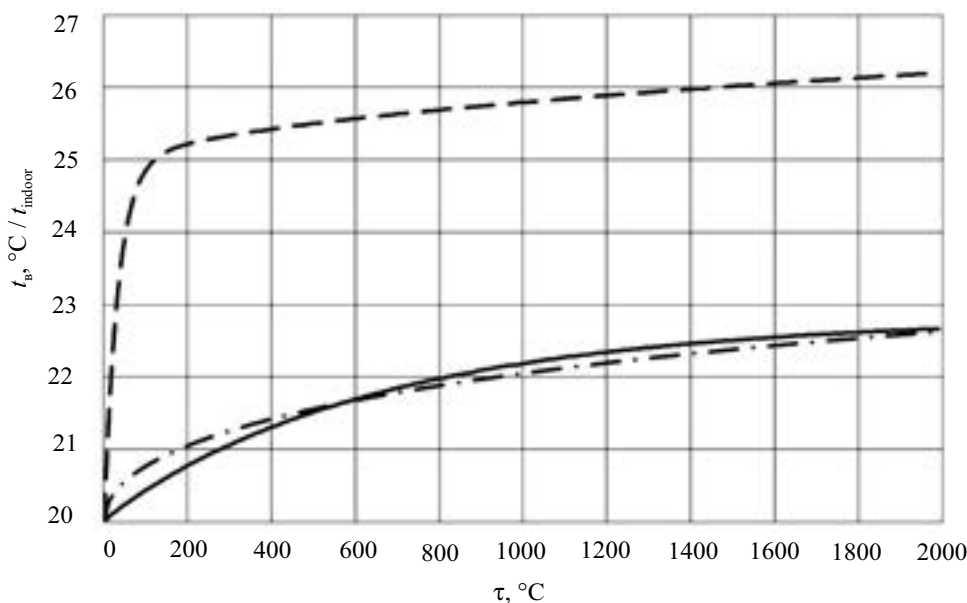


Рис. 1. Зависимость t_b от времени для расчетного помещения

Fig. 1. Dependence of t_{indoor} on time in an analyzed room

по выражению (2). Результаты показаны на рис. 1 сплошной линией. Для сравнения штрихпунктиром отмечены данные расчетов по программе, разработанной для ЭВМ автором с использованием конечно-разностной модели. Пунктир изображает поведение t_b при $A = 0$, т.е. в отсутствие автоматического регулирования по результатам численного расчета.

Нетрудно заметить, что выражение (6) дает достаточно хорошее совпадение с результатами программного расчета, а соотношение скорости роста t_b при наличии и отсутствии автоматизации так же выглядит вполне достоверным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования в целом подтверждена первоначальная гипотеза об экспоненциальном характере возрастания избыточной температуры в помещении, однако необходимо отметить, что аргумент экспоненты оказывается пропорционален корню квадратному из времени с момента начала остывания. Это объясняется характером распространения тем-

пературной волны в конструкциях ограждений помещения при малых моментах времени. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- на скорость изменения температуры в помещении при скачкообразном тепловом воздействии влияет главным образом соотношение коэффициента передачи регулятора и теплоинерционности «массивных» ограждающих конструкций;
- упрощенное аналитическое решение хорошо подтверждается результатами расчетов по численной модели;
- предельное значение приращения температуры воздуха помещения определяется отношением величины теплопоступлений и параметра, пропорционального коэффициенту передачи.

Дальнейшее развитие предлагаемого исследования может быть связано с уточнением временного диапазона, для которого полученная зависимость будет справедлива, а также с решением вопроса о возможности распространения достигнутых результатов на другие законы регулирования климатического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувшинов Ю.Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. М. : МГСУ — Изд-во АСВ, 2010. 319 с.
2. Рафальская Т.А. Энергетическая безопасность теплоснабжения при аварийном режиме отпуска теплоты от ТЭЦ // Промышленная энергетика. 2016. № 11. С. 23–27.
3. Рафальская Т.А., Березка А.К., Савенков А.А. Теоретическое исследование теплозащиты ограждающих конструкций зданий при аварийном теплоснабжении // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : мат. X Всеросс. науч.-техн. конф. 2017. С. 213–218.
4. Rafalskaya T.A. Reliability and controllability of systems of centralized heat supply // Eastern European Scientific Journal. 2016. No. 2. Pp. 228–235. DOI: 10.12851/EESJ201604C06ART10
5. Малявина Е.Г. Расчет темпа остывания помещения после отключения теплоснабжения // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 2. С. 55–58.
6. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 12 (1000). С. 42–43.
7. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. No. 1. Pp. 12–24. DOI: 10.15826/rjct.2016.1.002
8. Gabrielaitiene I. Numerical simulation of a district heating system with emphases on transient temperature behaviour // Environmental Engineering: proceedings of the 8th International Conference. Vilnius : VGTU Publ., 2011. Vol. 2. Pp. 747–754.
9. Horikiri K., Yao Y., Yao J. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment // Building and Environment. 2014. Vol. 77. Pp. 135–147. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.027
10. Tae Sup Yun, Yeon Jong Jeong, Tong-Seok Han, Kwang-Soo Youm. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes // Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. Pp. 125–132. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.043
11. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Алгоритм решения обобщенной задачи нестационарной теплопроводности в телах простой геометрической формы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 1. С. 112–128. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-112-128
12. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. Pp. 943–953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003

13. Jedinák R. Energy efficiency of building envelopes // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.855.39
14. Naji S., Shamshirband S., Basser H., Keivani A., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. Pp. 1520–1528. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.062
15. Hani A., Koiv T.-A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings // *Smart Grid and Renewable Energy*. 2012. Vol. 03. Issue 03. Pp. 231–238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
16. Акимов И.А., Акимов А.И., Каракулина Е.О. Исследование теплопередачи в многослойных цилиндрических изделиях на первом этапе производства композиционных материалов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2015. № 2. С. 68–72.
17. Bouhacina B., Saim R., Oztop H.F. Numerical investigation of a novel tube design for the geothermal borehole heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 79. Pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.027
18. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation // *Energies*. 2017. Vol. 10. Issue 6. P. 795. DOI: 10.3390/en10060795
19. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 496–501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501
20. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М. : Изд-во АСВ, 2014. 292 с.

Поступила в редакцию 12 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

О Б АВТОРЕ: **Олег Дмитриевич Самарин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1708-9583; samarinod@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kuvshinov Yu.Ya. *Energy saving in the building microclimate system*. Moscow, MGSU, ASV Publ., 2010; 319. (rus.).
2. Rafalskaya T.A. Energy security of heat supply in emergency regime of the release of heat from the cogeneration plant. *Industrial power-engineering*. 2016; 11:23-27. (rus.).
3. Rafalskaya T.A., Beryozka A.K., Savenkov A.A. Theoretical study of thermal protection of building envelopes in case of emergency heat supply. *Topical issues of architecture and construction: proceedings of the 10th All-Russian science and technical conference*. 2017; 213-218. (rus.).
4. Rafalskaya T.A. Reliability and controllability of systems of centralized heat supply. *Eastern European Scientific Journal*. 2016; 2:228-235. DOI: 10.12851/EESJ201604C06ART10
5. Malyavina E.G. Calculation of the rate of cooling of a room after turning off the heat supply. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 2:55-58. (rus.).
6. Doroshenko A.V. Simulation thermodynamic model of the building. *Bulletin of construction equipment*. 2017; 12(1000):42-43. (rus.).
7. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2016; 2(1): 12-24. DOI: 10.15826/rjct.2016.1.002
8. Gabrielaitiene I. Numerical simulation of a district heating system with emphases on transient temperature behaviour. *Environmental Engineering: proceedings of the 8th International Conference*. Vilnius, VGTU Publ., 2011; 2:747-754.
9. Horikiri K., Yao Y., Yao J. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment. *Building and Environment*. 2014; 77:135-147. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.027
10. Tae Sup Yun, Yeon Jong Jeong, Tong-Seok Han, Kwang-Soo Youm. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes. *Energy and Buildings*. 2013; 61:125-132. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.043
11. Eliseev V.N., Tovstonog V.A., Borovkova T.V. Solution algorithm of generalized non-stationary heat conduction problem in the bodies of simple geometric shapes. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.* 2017; 1:112-128. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-112-128 (rus.).

12. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 97:943-953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003
13. Jedinák R. Energy efficiency of building envelopes. *Advanced Materials Research*. 2013; 855: 39-42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.855.39
14. Naji S., Shamshirband S., Bassar H., Keivani A., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 53:1520-1528. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.062
15. Hani A., Koiv T.-A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2012; 03(03):231-238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
16. Akimov I.A., Akimov A.I., Karakulina E.O. Investigation of heat transfer in multy-layer cylindrical products at the first step of production of composite materials. *Scientific and technical herald of the Volga region*. 2015; 2:68-72. (rus.).
17. Bouhacina B., Saim R., Oztop H.F. Numerical investigation of a novel tube design for the geothermal borehole heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 79:153-162. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.027
18. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*. 2017; 10(6):795. DOI: 10.3390/en10060795
19. Samarin O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):496-501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501 (rus.).
20. Samarin O.D. Thermal physics. *Energy saving. Energy efficiency*. Moscow, ASV Publ., 2014; 292. (rus.).

Received December 12, 2019.

Adopted in a revised form on February 5, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

B I O N O T E S : **Oleg D. Samarin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of the Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1708-9583; samarinod@mgsu.ru.

Применение загрузочного материала BioChip в реакторе периодического действия

Чан Ха Куан, Е.С. Гогина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Во всем мире применение микробной биопленки является типичным методом модификации городских и промышленных очистных сооружений с аэротенками. В отличие от технологии с использованием активного ила биопленка содержит в своем составе большее количество бактерий за счет прикрепления и роста микроорганизмов на поверхности материала. Дана оценка применения BioChip в реакторе периодического действия (SBR) — разновидности технологии с применением свободноплавающего активного ила, когда все этапы очистки воды скомбинированы в одном резервуаре.

Материалы и методы. Для оценки способности применения материала BioChip в SBR-реакторе проведены эксперименты, направленные на решение поставленных задач по очистке от двух видов загрязняющих веществ: от органических веществ в типовой модели SBR; от биогенных элементов, особенно аммонийного азота, при создании анаэробной зоны в модификации модели реактора. При анализе качества сточных вод и очищенных вод в модели определена удельная скорость утилизации субстрата, нитрификации и денитрификации.

Результаты. Результаты проведенного эксперимента на лабораторной модели реактора показали эффективность очистки в диапазоне 80–90 % для органических веществ и 75–85 % для аммонийного азота. В модификации реактора с применением BioChip удельная скорость денитрификации в реакторе достигает 0,3–0,4 $N_{\text{вод}}/\text{кг}$ ил/сут, для процесса нитрификации значение скорости находится в диапазоне от 0,18 до 0,2 $\text{кг } N_{\text{вод}}/\text{кг}$ ил/сут. Удельные скорости и уравнение баланса азота в реакторе рекомендуют режим работы SBR с нагрузкой от 1,5–2,5 $\text{кг БПК-ТКН}/\text{кг}$ ил/сут.

Выводы. Низкая стоимость, простота транспортировки и использования, в сочетании с установленным операционным циклом реактора SBR для интенсификации эффективности очистки являются основными преимуществами применения материала BioChip. Для эксплуатации реактора SBR с применением материала BioChip и добавлением фаз нитрификации/денитрификации требуется наличие высококвалифицированного персонала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анаэробный, активный ил, биологический загрузочный материал, глубокая очистка сточных вод от аммонийного азота, денитрификация, нитрификация, реактор периодического действия, реконструкция и модификация городской очистной станции

Благодарности. Авторы выражают благодарность компании «АКВА Контроль» (г. Самара) за предоставление загрузочного материала BioChip 25.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чан Ха Куан, Гогина Е.С. Применение загрузочного материала BioChip в реакторе периодического действия // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 592–604. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.592-604

The applicability of bio-carrier BioChip in Sequencing Batch Reactors

Tran Ha Quan, Elena S. Gogina

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

ABSTRACT

Introduction. All over the world, the microbial biofilm has been regularly applied to modify urban and industrial wastewater treatment facilities that have aeration tanks. Unlike the activated sludge technology, the biofilm contains a substantial number of bacteria because microorganisms get attached to the surface of the material and grow there. The co-authors share their opinion about the BioChip, applied inside SBR, a sequencing batch reactor. This technology contemplates the use of free-floating activated sludge when all water treatment phases are concentrated inside one tank.

Materials and methods. To assess the usability of the BioChip inside the SBR reactor, experiments were conducted in an attempt to remove two types of contaminants: organic substances inside the standard model of an SBR reactor, and biogenic elements, in particular, ammonium nitrogen, in the course of developing an anoxic zone in a modified model of the SBR reactor. The per-unit speed of substrate recycling, nitrification and denitrification is determined as a result of the analysis of the quality of wastewater and treated water.

Results. The experiment conducted using the laboratory model of the SBR reactor has proven the water treatment efficiency within the range of 80–90 % in terms of organic substances and 75–85 % in terms of ammonium nitrogen. Inside the SBR reactor, that had a BioChip installed, the per-unit denitrification speed inside the reactor reached 0.3 to 0.4 N/kg of sludge/day, for the process of nitrification, the value of speed varies from 0.18 to 0.2 kg N/kg of sludge/day. Per-unit speed values and the nitrogen balance equation inside the SBR reactor suggest the SBR operating mode at the capacity of 1.5–2.5 kg of the biological oxygen demand–TKN/kg of sludge/day.

Conclusions. Low costs, smooth transportation and use in combination with the pre-set SBR reactor with a view to intensification of water treatment efficiency are the main strengths of the BioChip. The operation of the SBR reactor in combination with the BioChip and nitrification/denitrification phases requires highly skilled personnel.

KEYWORDS: Activated sludge, anoxic phase, bio – carrier media, municipal wastewater treatment, denitrification, nitrification, reconstruction and modification wastewater treatment plant, Sequencing Batch Reactor

Acknowledgements. I would like to express my deep gratitude to company “AKVA Control” in Samara for bio carrier Mutag BioChip 25.

FOR CITATION: Tran Ha Quan, Gogina E.S. The applicability of bio-carrier BioChip in Sequencing Batch Reactors. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):592-604. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.592-604 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Микробная биопленка представляет собой «совокупность микробных клеток, окруженных полимерной матрицей со способностью собственного воспроизводства», термин «пленка» в данном контексте характеризует бактериальную адгезию, процессы агрегации и размножения микробных клеток на поверхности [1]. Поэтому биопленку также можно определить как структуру, в которой взаимодействуют сообщества микроорганизмов и ассоциированных клеток с пониженной скоростью роста, регуляцией гена и генерацией внеклеточной полимерной матри-

цы [2]. Процесс удаления загрязняющих веществ с использованием биопленки при биологической очистке сточных вод показан на рис. 1 [3, 4].

На первом этапе субстрат в сточной воде расходуется внутри биопленки и отделяется застойным слоем, затем протекает по поверхности пленки. На следующем этапе субстраты, кислород и питательные вещества диффундируют через застойный (постоянный) слой внутрь биопленки; а продукты биоразложения из биопленки попадают обратно в жидкость. Основными сооружениями, в которых применяется биопленка, являются биофильтр, а также различные аэрационные сооружения, в которых

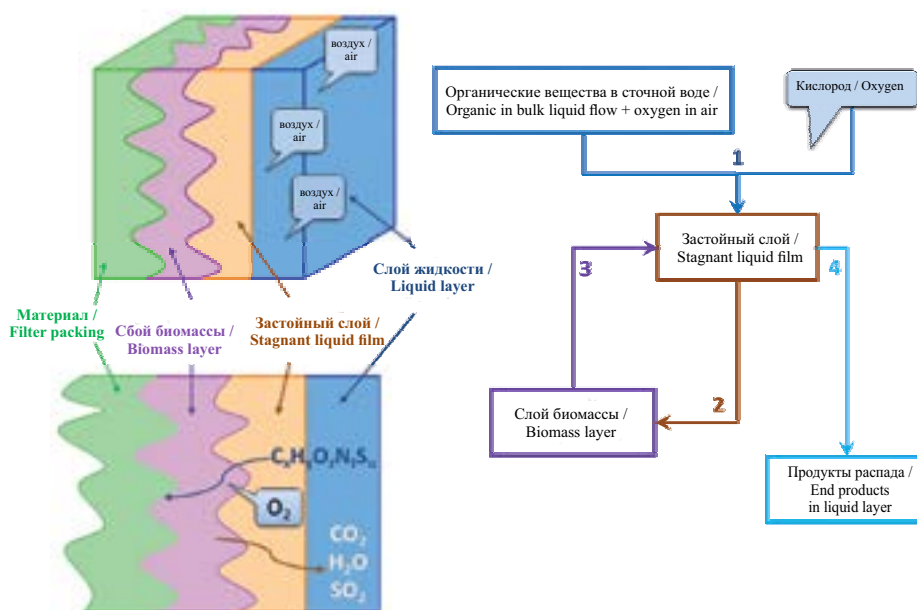


Рис. 1. Схема биологической очистки на поверхности биопленки

Fig. 1. Application of the BioChip in activated sludge technology

прикреплены биомассы для повышения эффективности процесса биологической очистки и удаления загрязняющих веществ в сточной воде.

В настоящее время материал BioChip 25™ широко применяется в практике биологической очистки сточных вод в России, особенно в мембранном биореакторе и в технологии с применением интегрированной пленки для активизации процесса биологической очистки в аэрационных сооружениях. По данным производителя Multi Umwelttechnologie AG, загрузочный материал Mutag BioChip 25™ имеет диаметр около 25 мм, толщину около 1,1 мм и большое количество открытых пор на поверхности для иммобилизации микроорганизмов. Таким образом, значение активной площади поверхности BioChip составляет более 4000 м²/м³, что обеспечивает оптимальную среду обитания бактерий в открытых порах и каналах материала¹. На рис. 2 показана конструкции загрузочного материала и применение BioChip в сооружениях активного ила.

Однако авторы статьи оценивали применение материала BioChip в реакторе периодического действия (SBR), также являющемся аэрационным сооружением, сочетая при этом в одном реакторе несколько процессов. Основная концептуальная разница между реактором периодического действия и аэротенком состоит в различии гидравлических условий, в которых работают сооружения. Традиционный аэротенк работает в постоянном проточном режиме,

тогда как в системе SBR поток сточных вод заполняет реактор в дискретный период времени и функционирует как реактор действия (рис. 3)² [5–7].

Применение материала BioChip в реакторе SBR несколько отличается от стандартного применения в аэрационных сооружениях: во-первых, реактор работает по фазам в дискретный период времени, поэтому работа загрузочного материала не зависит от гидравлического потока. Кроме того, отсутствие вторых отстойников и обратных возвратных потоков активного ила и нитратной воды не требуется в технологии SBR, таким образом, загрузочный материал BioChip всегда сохраняется внутри реактора^{3,4} [8]. Наконец, материал имеет плотность 0,95 кг/л и всегда находится во взвешенном состоянии в реакторе независимо от фазы реакции (смешение или аэрация и пр.) в реакторе¹.

На кафедре водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ проведены эксперименты по исследованию применения загрузочного материала Mutag BioChip 25™ в реакторе периодического действия. В ходе эксперимента модель SBR модернизирована для оптимизации эффективности работы и повышения качества очищенной воды. В процессе ис-

² Sequencing Batch Reactor // IWA the International water Association Publishing. URL: <https://www.iwapublishing.com/news/sequencing-batch-reactor>

³ Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems. United States Environmental Protection Agency, 2004. EPA 832-R-04-001.

⁴ Summary report SBR. United States Environmental Protection Agency, 1986. EPA/625/8-86/011.

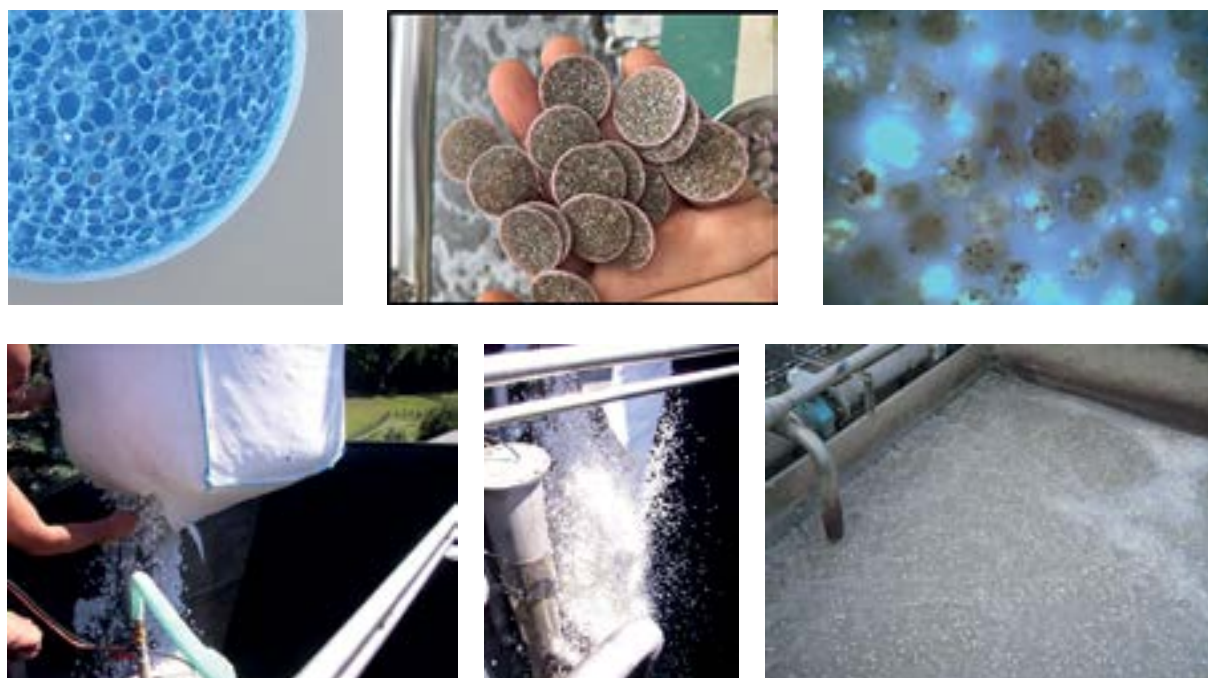
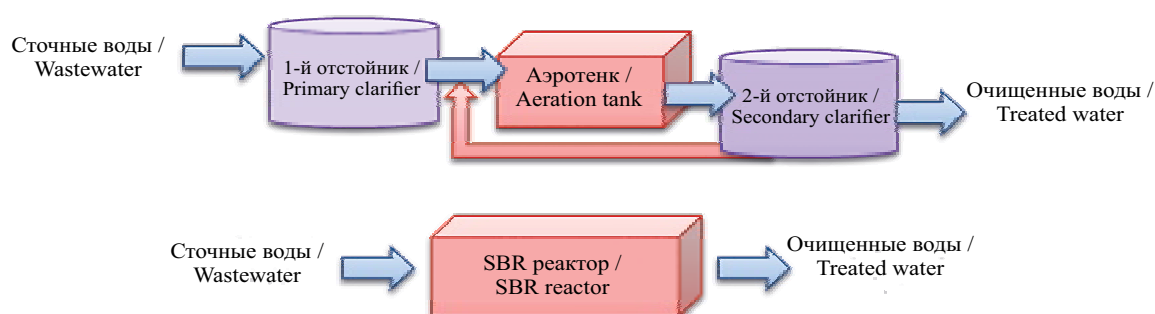


Рис. 2. Применение BioChip в технологии активного ила

Fig. 2. Application of the BioChip as part of the activated sludge technology

Гидравлические условия в сооружении / Hydraulic conditions inside the biological treatment construction



Операционный цикл в типовом реакторе / Operation circle of typical SBR reactor

Фаз / Phases	1 Подача / 1 Fill	2 Реакция / Reaction	3 Осаждение и слив / 3 Sedimentation and Discharge
Операции / Operations			

Рис. 3. Разница между SBR и AS

Fig. 3. The difference between SBR and traditional activated sludge technology

следования анализировались параметры качества сточных вод, активного ила и очищенных вод для определения скорости утилизации субстрата, а также удельной скорости нитрификации и денитрификации реактора [9–13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее частый режим работы реактора периодического действия — последовательное чередование фаз «Подача — Реакция — Слив». С целью исследования оптимизации с применением материала BioChip в SBR-реакторе эксперимент был разделен на 2 этапа: в первом BioChip используется в типовой модели SBR, и выполнение расчета ско-

рости утилизации субстрата проводится сравнением качества очищенной воды в модели с материалом/ без материала. Далее из результатов первого этапа лабораторная модель реактора модернизируется для увеличения эффективности очистки от биогенных элементов, особенно азота в сточной воде. Один из предложенных вариантов модернизации — введение анатоксического процесса в режим работы реактора во втором этапе эксперимента. Главной задачей второго этапа является определение удельной скорости нитрификации и денитрификации при применении материала в реакторе. Схема эксперимента показана на рис. 4.

В первом этапе две модели реактора SBR работали параллельно и одна из них использовала

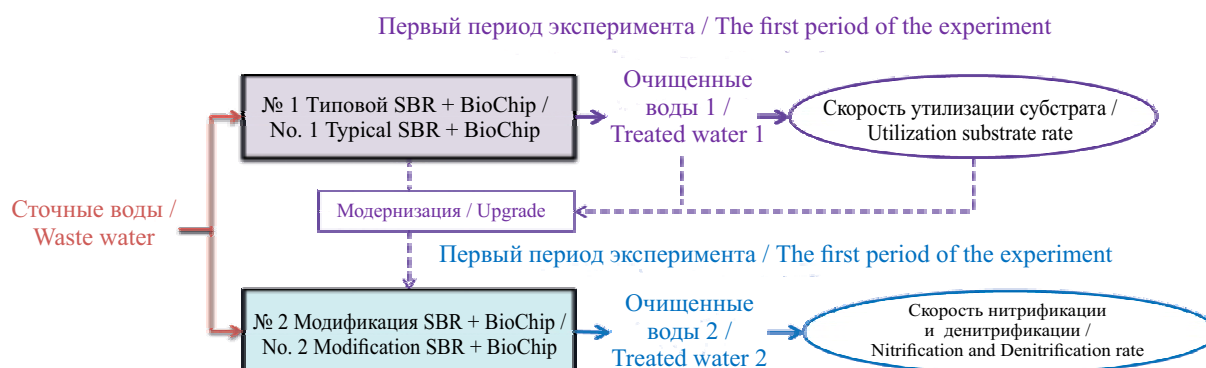


Рис. 4. Схема эксперимента

Fig. 4. Experiment site of modify SBR by BioChip

БиоChip. После анализа качества сточных и очищенных вод в каждой модели, включая биологическое потребление кислорода (БПК)₅, химическое потребление кислорода (ХПК), N-NH₄, N-NO₃^{5,6}, определяется производительность модели с БиоChip. В связи с качеством очищенных вод вычисление скорости утилизации субстратов осуществляется с использованием уравнения Моно [3, 4, 14]. Детали первого периода показаны на рис. 5.

$$r_{su} = -\frac{\mu_m X L}{K_L + L},$$

где r_{su} — скорость утилизации субстрата, г/м³·сут; μ_m — максимальная удельная скорость роста, г субстрата/г микроорганизм·сут; L — концентрация субстрата, г/м³; X — концентрация биомассы, г/м³; K_L — константа полунасыщения, равна концентрации субстрата, при которой скорость процесса равна $\mu_m / 2$, г/м³.

По результатам первого этапа эксперимента модель реактора была модернизирована и в операционный цикл добавлен аноксидный процесс. В аноксидном режиме производилось перемешивание иловой смеси, наблюдалось проведение процессов нитрификации и денитрификации в реакторе для интенсификации глубокой очистки азота в сточной воде [15–17]. Поэтому для обеспечения условий биоло-

гической реакции денитрификации смешение насоса установлено внутри модели реактора периодического действия. Таким образом, основной задачей второго этапа стало определение удельной скорости нитрификации и денитрификации. Схема модели и формулы этого этапа показаны на рис. 6^{7,8} [18–20].

Удельная скорость денитрификации /
Specific denitrification rate (SDNR)

$$\text{УСД} = \frac{\text{NO}_3 \cdot V_{\text{анокс}}}{\text{ВВ}},$$

где УСД — удельная скорость денитрификации; NO₃ — количество удаленного нитрата; $V_{\text{анокс}}$ — объем реактора аноксидного или модели SBR реактора; ВВ — взвешенные вещества в смешанной жидкой среде.

Удельная скорость нитрификации /
Specific nitrification rate (SNR)

$$\mu_n = \left(\frac{\mu_{nm} \cdot N}{K_n + N} \right) \left(\frac{DO}{K_o + DO} \right),$$

где μ_n — удельная скорость нитрификации (УСН); μ_{nm} — максимальная удельная скорость нитрификации; N — концентрация азота; K_n — константа полунасыщения для нитрификации; DO — концентрация растворенного кислорода; K_o — коэффициент полунасыщения кислорода.

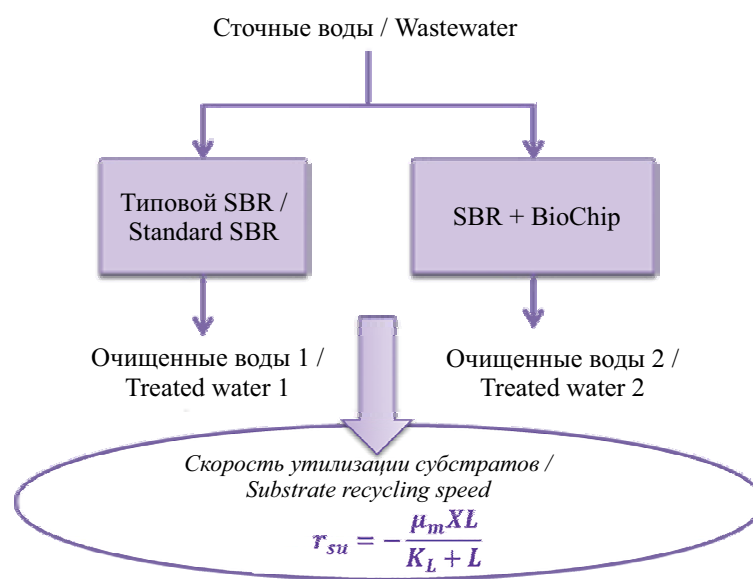
⁵ Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. / ed. Lenore C., Arnold G., Andrew E. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.

⁶ Унифицированные методы исследования качества вод. М. : Совет экономической взаимопомощи, 1987. Ч. 1.

⁷ Biological Nutrient Removal Processes // Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Water Environment Federation, 2007. Vol. 2.

⁸ Nitrification Denitrification. Michigan Department of Environmental Quality Operator Training and Certification Unit.

Схема эксперимента / Schematic course of the experiment



Скорость утилизации субстратов / Substrate recycling speed

Рис. 5. Первый этап эксперимента

Fig. 5. Rate of utilization substrate

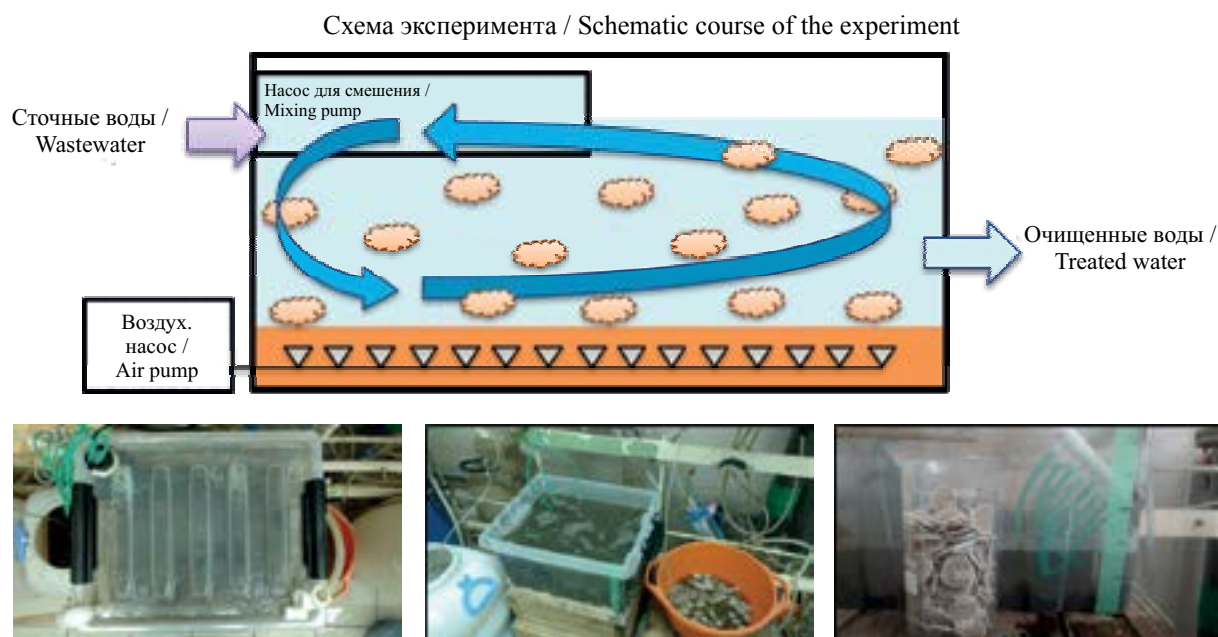


Рис. 6. Второй этап эксперимента

Fig. 6. The second stage of the experiment

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый этап эксперимента

Эффективность удаления загрязняющих веществ в сточной воде показана на графиках на рис. 7.

Как видно из представленных графиков, при использовании материала BioChip в типовом реакторе эффективность удаления органических веществ по БПК5 и ХПК увеличивается на 10–15 %. Кроме того, процесс нитрификации и удаления аммонийного азота также увеличивается на 5 % и достигает максимально 75 %. Таким образом, скорость утилизации субстратов с применением загрузочного материала повышается на 20–30 %, а биологические реакции в системе BioChip — SBR характеризуются большей стабильностью, даже при увеличении концентрации БПК и ХПК сточных вод. Кроме того, графики показали, что оптимальное время работы фазы реакции модели равно 8 часов.

Второй этап эксперимента условно разделен на два периода, соответствующих порядку реакций в процессе биологической очистки. Фаза реакции реактора на первом периоде начинается с 5 ч аэрации и затем переходит на 3 ч анаэробного режима; на втором периоде действует обратный порядок — фаза реакции начинается с 3 ч анаэробного режима и 5 ч аэробного. Последовательность второго этапа — обратная, соответственно, реакции денитрификации — нитрификации. Циклы работы каждого этапа и их результаты показаны на рис. 8 [9, 10].

Концентрация очищенных вод первого и второго периода

Несмотря на отличие рабочего режима, эффективность очистки органических веществ на втором

периоде эксперимента в основном стабильна и достигает 80–85 %. Однако производительность процесса очистки от аммонийного азота на первом этапе лучше, чем на втором. При анализе концентрации аммонийного азота и суммы азота по Кьельдалю (TKN) в очищенной воде эффективность очистки первого периода выше на 5–10 % для $N-NH_4$ и на 10–15 % для TKN. Таким образом, эффективность очистки от аммонийного азота стабилизируется в диапазоне 75–85 % и выше, чем в первом периоде эксперимента на 5–10 %.

Имея концентрацию нитратов в реакторе после каждой фазы, можно определить удельную скорость нитрификации и денитрификации в реакторе с применением BioChip и введением анаэробного режима.

Сначала УСН на втором периоде эксперимента остается неизменной и находится в диапазоне от 0,18 до 0,2 кг $N_{окс}/кг$ ил/сут. Поэтому УСД является основной причиной повышения производительности процесса удаления аммонийного азота в эксперименте. Значение УСД первого периода выше, чем второго периода, на 0,1 кг $N_{вос}/кг$ ил/сут, и в этом причина повышения эффективности удаления аммонийного азота на 5 %. На втором периоде последовательность проведения процессов нитрификации и денитрификации соответствует фазам работы реактора. Так, образование нитратов способствует началу естественного процесса денитрификации. УСД на первом этапе достигает значения 0,3–0,4 кг $N_{вос}/кг$ ил/сут. На рис. 9 показана взаимосвязь между удельными скоростями и нагрузкой реактора.

В основном значения УСН обратно пропорциональны, и УСД пропорциональны нагрузке БПК/TKN. На графике точка пересечения каждой пары

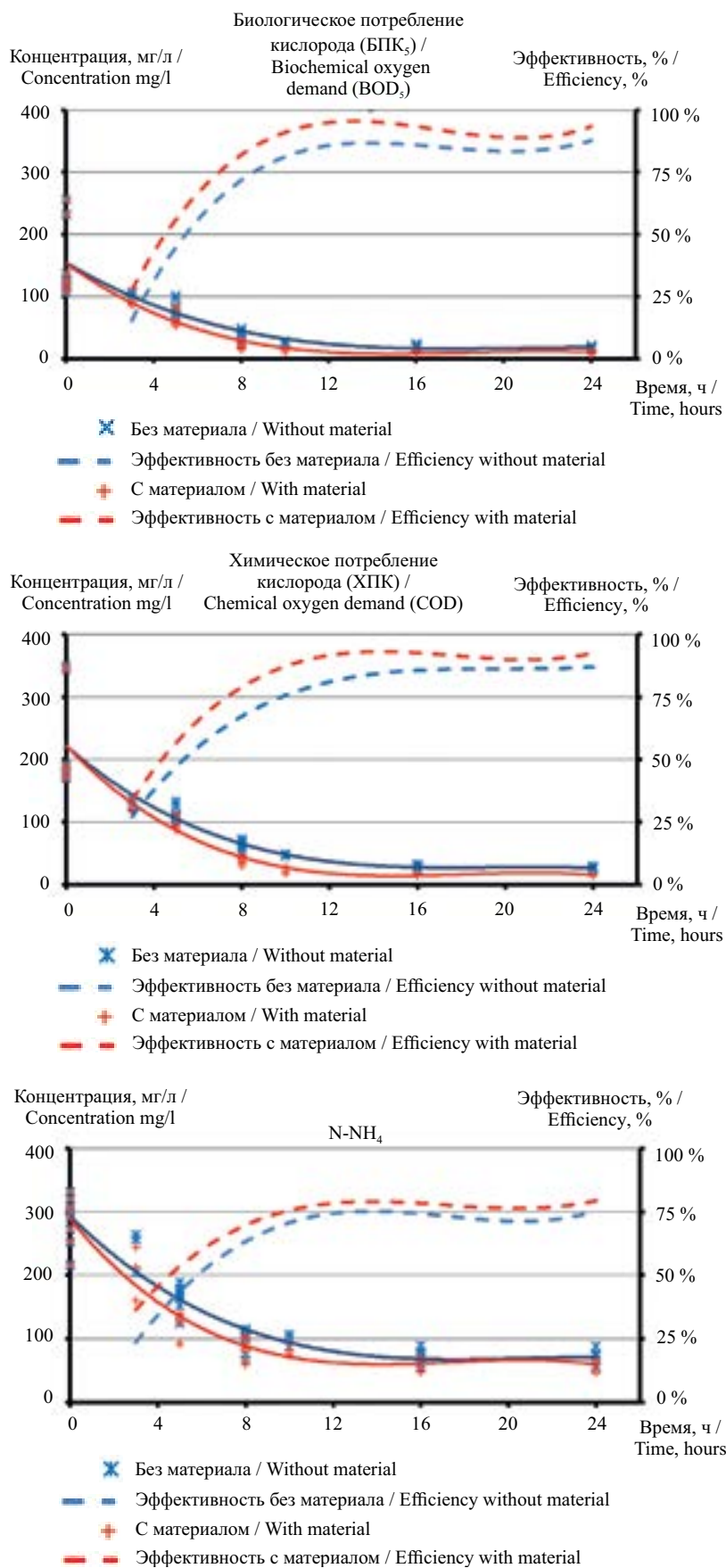


Рис. 7 (начало). Эффективность очистки загрязняющих веществ и скорость утилизации субстратов
Fig. 7. Contaminant removal efficiency and substrate recycling speed

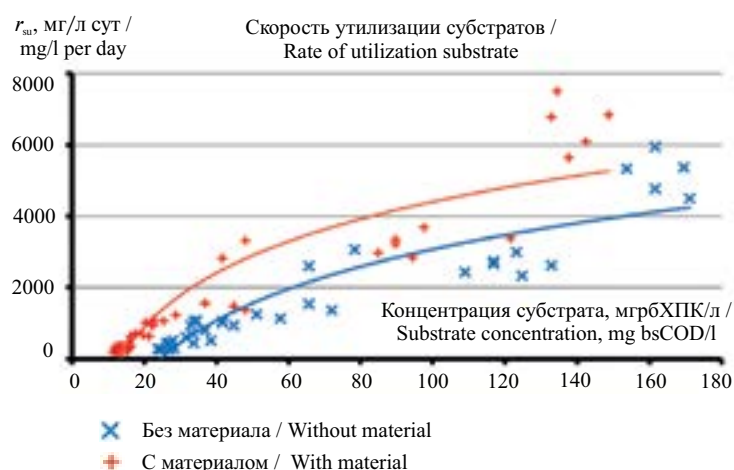


Рис. 7 (окончание). Эффективность очистки загрязняющих веществ и скорость утилизации субстратов
Fig. 7. Contaminant removal efficiency and substrate recycling speed

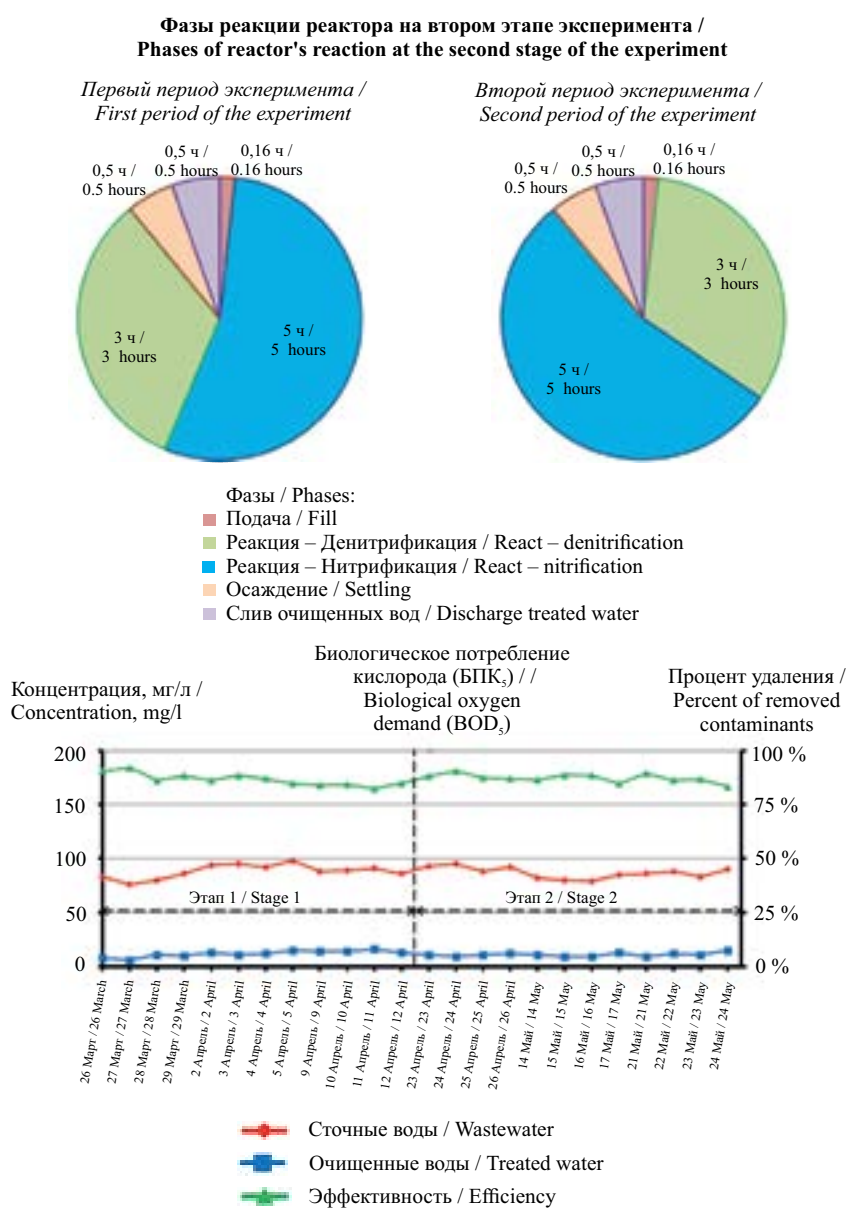


Рис. 8 (начало). Режим работы реактора и эффективность очистки от загрязняющих веществ на каждом периоде
Fig. 8. The operating mode of the reactor and contaminant removal efficiency during each period

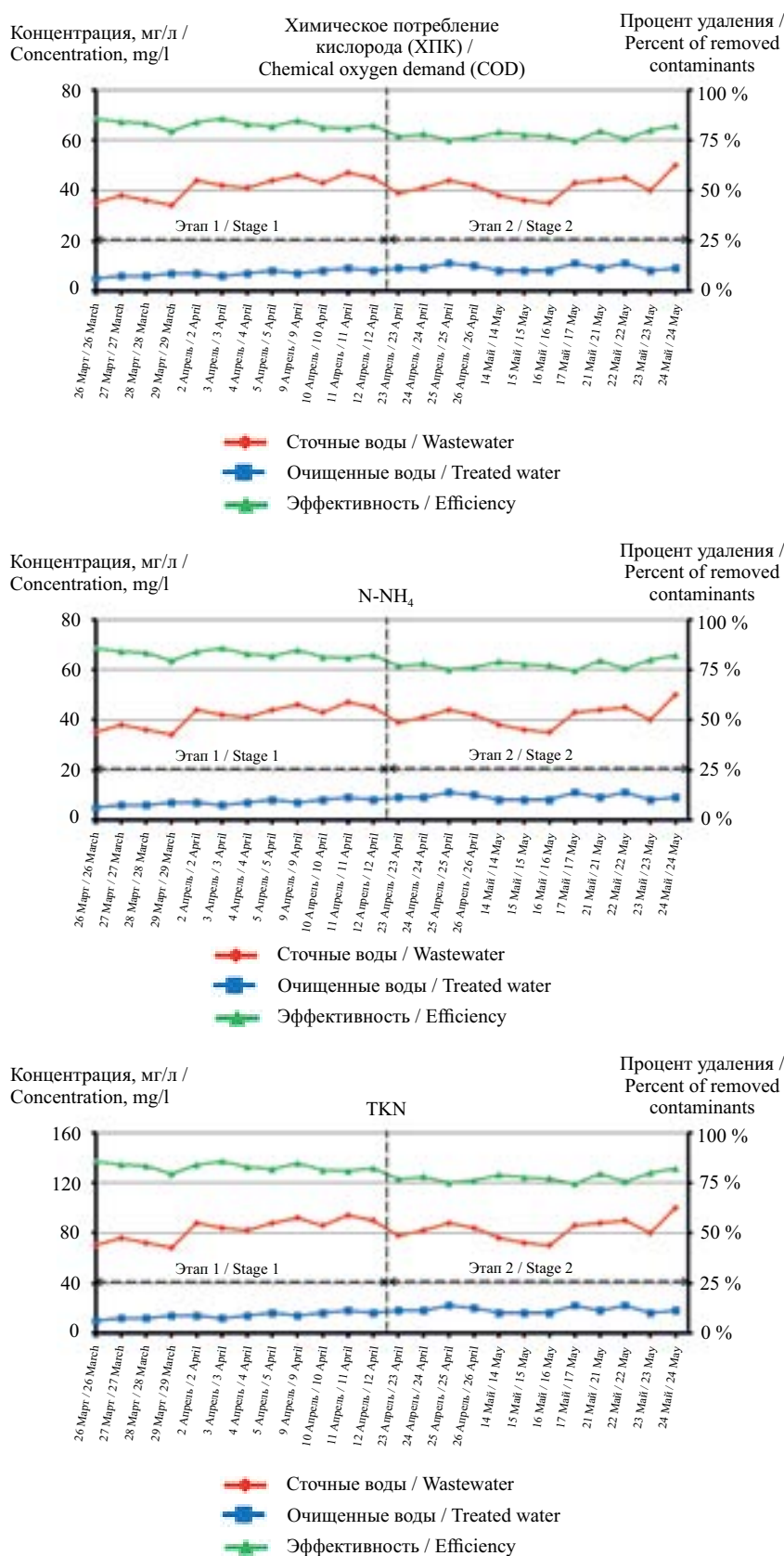


Рис. 8 (окончание). Режим работы реактора и эффективность очистки от загрязняющих веществ на каждом периоде
Fig. 8. The operating mode of the reactor and contaminant removal efficiency during each period

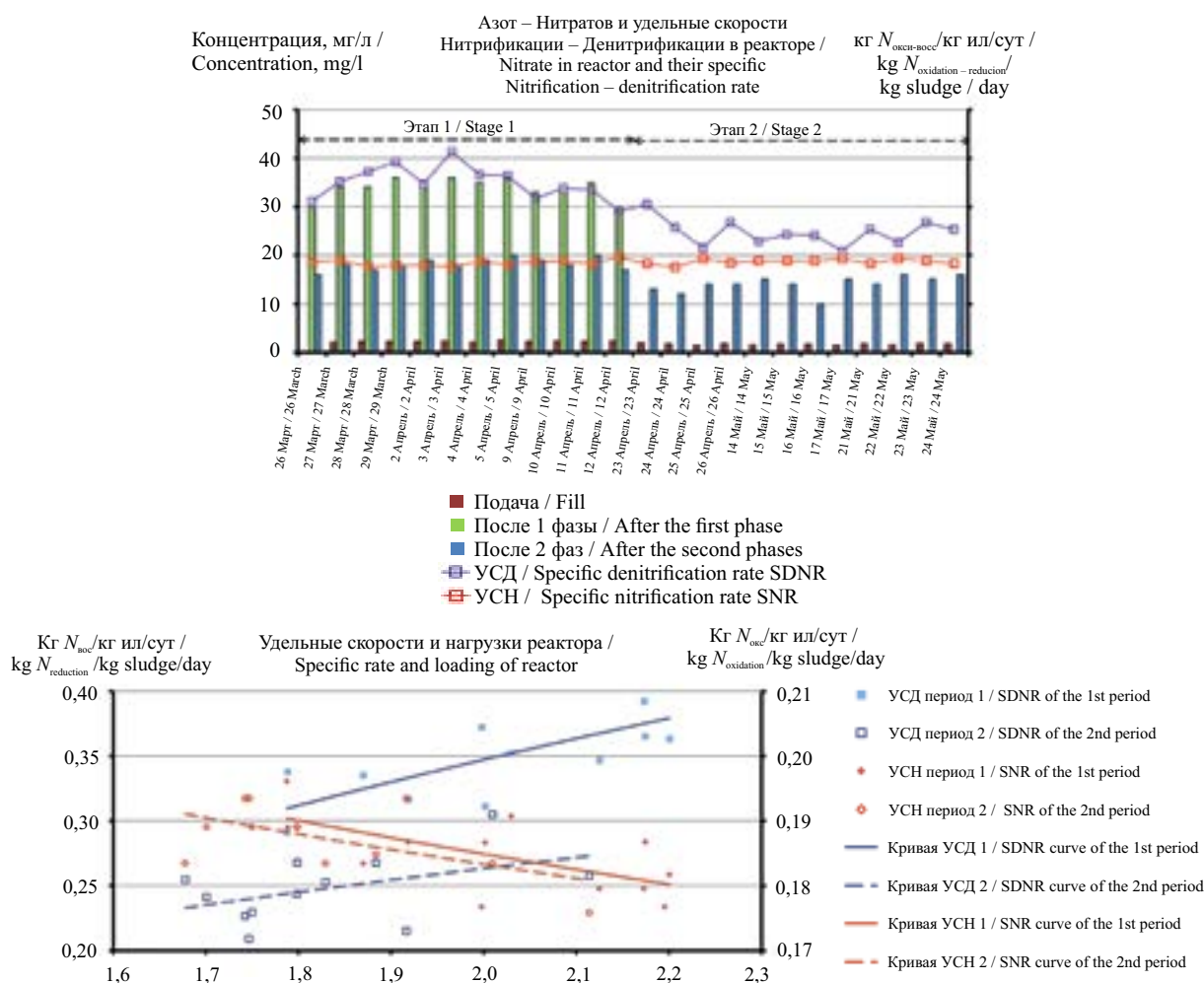


Рис. 9. Концентрация нитратов и взаимосвязь между удельными скоростями и нагрузкой

Fig. 9. Concentration of nitrates and interrelation between per-unit speed values and load

кривых (период 1 и 2) показывает оптимальные параметры работы реактора SBR с применением материала BioChip для интенсификации процесса глубокой очистки сточных вод от соединений азота. При нагрузке на реактор 1,9–2,1 кг БПК–TKN/кг ил/сут предпочтительный режим работы реактора соответственно аноксидный — аэрационный — осажде- ние. Обратный порядок аэрационный — аноксидный — осажде- ние применяется в реакторе при нагрузке 1,6–1,9 кг БПК–TKN/ кг ил/сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение загрузочного материала в технологи- ии очистки сточных вод с применением активного ила является одним из способов модификации и мо- дернизации очистных станций. Низкая стоимость, простота транспортировки и использования в соче- тании с установленным операционным циклом ре- актора SBR — основные преимущества применения

материала BioChip. При этом эффективность очист- ки от аммонийного азота повышается до 85 % при нагрузке на реакторе 1,6–2,2 кг БПК–TKN/кг ил/сут. Краткое изложение рекомендаций по режиму рабо- ты реактора SBR с материалом BioChip для очистки сточных вод показано на рис. 10 с применением фор- мул баланса азота биологической реакции в реакторе.

Однако следует отметить, что для эксплуатации реактора SBR с применением материала BioChip и добавлением фаз нитрификации/денитрификации необходимо наличие высококвалифицированного персонала. Кроме того, как показал эксперимент, изменение условий среды (например: pH, раство- ренный кислород, и т.д.) в реакторе для успешного проведения аноксидной фазы до аэрации и/или в об- ратном порядке требует сложного оборудования ре- актора для успешной эксплуатации и контроля его работы. Таким образом, требуется технико-эконо- мический расчет применения данной технологии на конкретных очистных сооружениях.

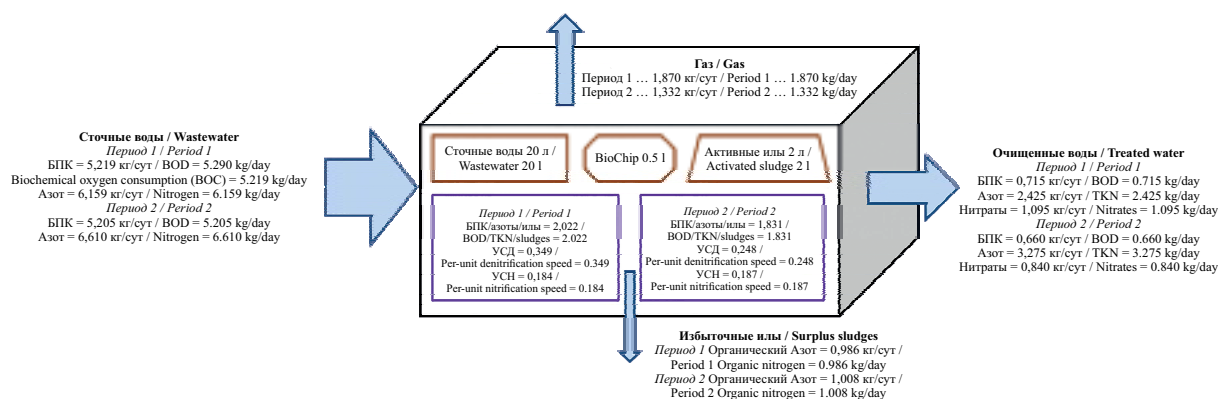


Рис. 10. Баланс азота в SBR реакторе второго этапа эксперимента

Fig. 10. Nitrogen balance inside the SBR reactor at the second stage of the experiment

ЛИТЕРАТУРА

1. Høiby N. A short history of microbial biofilms and biofilm infections // APMIS. 2017. Vol. 125. Issue 4. Pp. 272–275. DOI: 10.1111/apm.12686
2. Chakraborty S., Khopade A., Mahadik K.R. Biofilm: Importance and applications // Indian Journal of Biotechnology. 2009. Vol. 8. Issue 2. Pp. 159–168.
3. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2006. 704 с.
4. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed. Mc Graw Hill, 2003.
5. Панова И.М., Нойберт И. Биологическая очистка по технологии SBR // Экология производства. 2014. № 6. С. 58–61.
6. Poltak R.F. Sequencing Batch Reactor Design and Operational Considerations. New England Interstate Water pollution control commission, 2005.
7. Leal L.H., Temmink H., Zeeman G., Buisman C.J.N. Comparison of Three Systems for Biological Greywater Treatment // Water. 2010. Vol. 2. Issue 2. Pp. 155–169. DOI: 10.3390/w2020155
8. Чан Ха Куан, Гогина Е.С., Нгуен Суан Кует. Преимущества технологии реактора циклического действия для очистки сточных вод // Строительство — формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, Москва 26–28 апреля 2017. М.: МГСУ, 2017. С. 1093–1096.
9. Ha Quan T., Gogina E. Application of anoxic phase in SBR reactor to increase the efficiency of ammonia removal in Vietnamese municipal WWTPs // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701017
10. Чан Ха Куан, Гогина Е.С. Методы реконструкции и модификации реактора периодического действия станций очистки сточных вод во Вьетнаме // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 5. С. 589–602. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.589-602
11. Чан Ха Куан, Гогина Е.С. Решение вопросов биологической очистки с применением реактора периодического действия в условиях Вьетнама // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 1. С. 32–35.
12. Чан Ха Куан, Гогина Е.С. Операционные параметры реактора периодического действия SBR при глубокой очистке бытовых сточных вод от аммиака // Яковлевские чтения: сб. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ». М.: МИСИ – МГСУ, 2019. URL: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/>
13. Чан Ха Куан, Гогина Е.С. Оценка применения биопленки в процессе биологической очистки бытовых сточных вод во Вьетнаме // Яковлевские чтения: XIII междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти академика РАН С.В. Яковлева. 2018. С. 134.
14. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 // Water Intelligence Online. 2015. Vol. 5. Issue 0. DOI: 10.2166/9781780402369
15. Biological Nutrient Removal Processes // Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Water Environment Federation, 2007. Vol. 2. P. 22.
16. Magrí Albert, Flotats Xavier. Modelling of biological nitrogen removal from the liquid fraction of pig slurry in a sequencing batch reactor // Biosystems Engineering. 2008. Vol. 101. No. 2. Pp. 239–259. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2008.08.003
17. Byung-Dae Lee. Theoretical Evaluation of Nitrogen Removal in Anoxic-oxic-anoxic-oxic Process // International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences 2016. Vol. 4. No. 3. P. 4.
18. Song X., Zhao L., Liu D., Zhao J. Step-feeding SBR for nitrogen removal from expressway service area sewage. Penang, Malaysia, 2017. P. 040021. DOI: 10.1063/1.4977293

19. Morling S. Nitrogen removal efficiency and nitrification rates at the Sequencing Batch Reactor in Nowy Targ, Poland, 2008. Vol. 8. No. 11. Pp. 121–128.

20. Zhu S., Chen S. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters // *Aquacultural Engineering*. 2002. Vol. 26. No. 4. Pp. 221–237. DOI: 10.1016/S0144-8609(02)00022-5

Поступила в редакцию 12 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

О Б АВТОРАХ: **Чан Ха Куан** — аспирант кафедры водоотведения и водной экологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57205221687; VIVE@mgisu.ru;

Елена Сергеевна Гогина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры водоотведения и водной экологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015; goginaes@mgisu.ru.

REFERENCES

1. Høiby N. A short history of microbial biofilms and biofilm infections. *APMIS*. 2017; 125(4):272–275. DOI: 10.1111/apm.12686

2. Chakraborty S., Khopade A., Mahadik K.R. Biofilm: Importance and applications. *Indian Journal of Biotechnology*. 2009; 8(2):159–168.

3. Voronov U.V., Yakovlev S.V. Wastewater and wastewater treatment. Moscow, MGSU Publishing house ASV, 2006; 704. (rus.).

4. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th ed. Mc Graw Hill. 2003.

5. Panova I.M., Noiberg I. Technology biological wastewater treatment SBR. *Ecology Production*. 2014; 6:58–61. (rus.).

6. Poltak R.F. *Sequencing Batch Reactor Design and Operational Considerations*. New England Interstate Water pollution control commission, 2005.

7. Leal L.H., Temmink H., Zeeman G., Buisman C.J.N. Comparison of Three Systems for Biological Greywater Treatment. *Water*. 2010; 2(2):155–169. DOI: 10.3390/w2020155

8. Tran Ha Quan, Gogina E.S., Nguyen Xuan Quyet. Advantages of Sequencing Batch Reactor in wastewater treatment Collection of conference reports. *Construction — the formation of the living environment : collection of works XX International interuniversity scientific-practical conf. students, undergraduates, Moscow, April 26–28, 2017*. Moscow, MGSU, 2017; 1093–1096. (rus.).

9. Ha Quan T., Gogina E. Application of anoxic phase in SBR reactor to increase the efficiency of ammonia removal in Vietnamese municipal WWTPs. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01017. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701017

10. Tran Ha Quan, Gogina E.S. Methods of reconstruction and modification of the sequencing batch reactor at municipal wastewater treatment plants in Vietnam. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(5):589–602. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.589-602 (rus.).

11. Tran Ha Quan, Gogina E.S. Application biological wastewater treatment by using Sequencing batch reactor in Vietnam. *BST: Building equipment bulletin*. 2018;1:32–35. (rus.).

12. Tran Ha Quan, Gogina E.S. The operation parameters of Sequencing Batch Reactor when applying nitrifying method. Collection of conference reports. *Yakovlev readings: collection of reports of the XIV International scientific and technical conference dedicated to the memory of academician of the RAS S.V. Yakovlev and the 90th anniversary of the establishment of the faculty of "ViV", Moscow, MISI – MGSU, 2019*. URL: <http://mgisu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdstupa/> (rus.).

13. Chan Ha Kuan, Gogina E.S. Assessment of the use of biofilms in the biological treatment of domestic wastewater in Vietnam. *Yakovlev readings: XIII international scientific and technical conference dedicated to the memory of academician of the RAS S.V. Yakovleva*. 2018; 134. (rus.).

14. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. *Water Intelligence Online*. 2015; 5(0). DOI: 10.2166/9781780402369

15. Biological nutrient removal processes. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. *Water Environment Federation*, 2007; 2:22.

16. Magrí Albert, Flotats Xavier. Modelling of biological nitrogen removal from the liquid fraction

of pig slurry in a sequencing batch reactor. *Biosystems Engineering*. 2008; 101:2:239-259. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2008.08.003

17. Byung-Dae Lee. *Theoretical Evaluation of Nitrogen Removal in Anoxic-oxic-anoxic-oxic Process*. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences 2016; 4:3:4.

18. Song X., Zhao L., Liu D., Zhao J. *Step-feeding SBR for nitrogen removal from expressway service*

area sewage. Penang, Malaysia, 2017; 040021. DOI: 10.1063/1.4977293

19. Morling S. *Nitrogen removal efficiency and nitrification rates at the Sequencing Batch Reactor in Nowy Targ*, Poland. 2008; 8(11):121-128.

20. Zhu S., Chen S. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering*. 2002; 26:4:221-237. DOI: 10.1016/S0144-8609(02)00022-5

Received December 12, 2019.

Adopted in a revised form on February 5, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

B I O N O T E S : **Tran Ha Quan** — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, Scopus: 57205221687; VIVE@mgsu.ru;

Elena S. Gogina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Wastewater Treatment and Ecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC : 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015; goginaes@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 338.5:69

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.605-616

Актуальные вопросы совершенствования системы ценообразования в строительстве в переходном периоде

В.В. Соловьев¹, А.П. Корчагин²

¹ Дирекция по комплексной реконструкции железных дорог и строительству объектов железнодорожного транспорта — филиал ОАО «Российские железные дороги» (ДКРС ОАО «РЖД»); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Взятый руководством строительной отрасли курс на переход к ресурсному методу определения сметной стоимости определяет основные цели совершенствования системы ценообразования. Первостепенное значение приобретает мониторинг цен строительных ресурсов. Исследование основывается на анализе текущей потребности отечественного строительства в актуализации нормативной информации и совершенствовании методологии ценообразования.

Материалы и методы. В условиях усилившейся роли государственных структур, в сметном нормировании осуществлено решение насущной задачи — оценки отраслевого сегмента ценообразования на основе показателя качества. Основой для его разработки избраны показатели, характеризующие реализацию инвестиционного процесса, прежде всего, в деятельности заказчика. Данная методология позволяет оценивать ценообразующий сегмент нормативной базы с необходимой степенью обобщения представленных данных.

Результаты. Проведенный эксперимент оценки используемой в настоящее время сметно-нормативной базы в части специализированных объектов строительства показал, что наибольшее значение в практической деятельности по формированию фактических цен реализации строительной продукции имеют факторы, описывающие стадию реализации строительного проекта в соотношениях сметных и фактических затрат строительной организации. В условиях затрудненного внесения изменений в показатели сметных нормативов сформирован круг решений в сфере мониторинга цен строительных ресурсов и формирования расчетных моделей индексации цен.

Выводы. Наилучшие перспективы адаптации нормативной цены к фактическим затратам на создание строительной продукции следует связывать с мониторингом цен на строительные ресурсы по полной их номенклатуре. Решение методических задач в этом направлении должно обеспечить повышение достоверности определения сметной стоимости строительства. Научная новизна и практическая значимость исследования обусловлены анализом текущей стадии развития нормативно-методической системы как на федеральном, так и на отраслевом уровне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сметная стоимость, мониторинг, ценообразование, анализ затрат, нормативы, торги

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев В.В., Корчагин А.П. Актуальные вопросы совершенствования системы ценообразования в строительстве в переходном периоде // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 605–616. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.605-616

Current issues of improving the pricing system in construction in the transition period

Vyacheslav V. Solov'ev¹, Alexey P. Korchagin²

¹ Directorate for complex reconstruction of Railways and construction of railway transport facilities-branch of JSC "Russian Railways"; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The focus on transition to the input method of estimated cost accounting, demonstrated by the leaders of the construction industry, outlines the principal goals pursued in the process of improving the pricing system. The monitoring of prices for construction resources gains in importance. The research is based on the analysis of the construction industry's current need for updated regulatory information and an improved pricing methodology.

Materials and methods. A relevant problem of pricing, which is now quality-driven, has been solved by the construction industry amidst the strengthening role of government agencies. Presently, pricing is driven by the factors that characterize the course of an investment process, primarily, promoted by the customer. This methodology encompasses the assessment of pricing regulations with a required extent of generalization in terms of any submitted data.

Results. The experiment conducted to assess the established pricing regulations in terms of special construction facilities has proven the maximal significance of factors, describing a construction project stage as a correlation between estimated and actual costs incurred by a construction company. Against the background of impeded introduction of changes into costing standards, a pool of solutions has been generated to monitor prices for construction resources and to generate price escalation models.

Conclusions. The best methods used to adapt standard prices to actual costs of construction products should involve the monitoring of prices for the whole range of construction resources. Methodological problems are to be solved in a way that must improve the trustworthiness of estimated construction costs. The novelty and practical significance of this research stem from the analysis of the current development stage of the system of federal and industry-specific regulations and methodologies.

KEYWORDS: estimated cost, monitoring, pricing, cost analysis, regulations, tenders

FOR CITATION: Solov'ev V.V., Korchagin A.P. Current issues of improving the pricing system in construction in the transition period. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):605-616. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.605-616 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью исследования сферы ценообразования в строительстве является свойство системы сметных нормативов и процессов формирования стоимости строительной продукции не ориентировать исследователя к однократному и окончательному результату. Поскольку метод расчета цены продукции — нормативный, детализированный, с полным государственно-отраслевым регулированием, все технологические и рыночные запросы строительной сферы вынуждены проходить через фильтр нормативного регулирования. Это позволяет периодически решать одни и те же задачи, возвращаясь к выполненному анализу, переоценивая его результаты. Если при поэтапном введении сметно-нормативной базы 2001 г. в части строительно-монтажных работ стояли преимущественно задачи экстенсивного освоения номенклатуры сборников, как это отмечалось в трудах [1, 2], то сразу после ее ввода остро встали проблемы отраслей, где выполняются специализированные работы. Цели и задачи отраслевого уровня сметного нормирования подробно описаны в работах [3, 4], показана связь экспертной деятельности с анализом сметных нормативов. Решение указанных задач заняло большое время, вследствие чего произошло отставание темпов разработки новых и актуализации существующих сметных нормативов от изменений уровня развития техники и технологии в строительстве [5], кроме того, изменения потребностей инвесторов и управляющих проектами способствовали активному развитию методологии формирования укрупненных сметных нормативов [6]. В отече-

ственной экономической науке подход к решению задач ценообразования преимущественно сфокусирован на выделении и оптимизации роли заказчика и управляющего проектом в строительстве [7], либо абстрактном определении субъекта управления стоимостью [8], а также на объективности создаваемых нормативов [9]. Зарубежные подходы к совершенствованию нормативов вследствие отсутствия серьезных реформ на протяжении длительного времени подчинены идеям совершенствования бизнес-подходов в деле стоимостного менеджмента [10]. Перспективны также практические приложения современных методов математического моделирования для построения стоимостных моделей [11]. Интерес представляют и исследования в области регрессионного анализа стоимости строительства в моделях линейного типа, которые могут быть адаптированы к отечественной практике предварительного определения цены строительства [12].

В этой связи современный круг задач ценообразования, по мнению авторов, состоит в повышении достоверности определения сметной стоимости и создании условий для перехода на ресурсный метод составления локальных сметных расчетов.

Согласно Плану утверждения сметных нормативов на 2019 год, утвержденному приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.05.2019 № 256/пр, в стадии реализации находится разработка нормативов по двум тысячам позиций. При таком годовом объеме разработки нормативов следует признать, что масштаб процесса сметного нормирования, долгое время вызывавший нарекание профессионального сообщества, наконец станет

достаточным для нормативного обеспечения как общестроительных, так и специализированных работ.

Наиболее активными участниками процесса по формированию плана стали такие компании, как ОАО «РЖД», ГК «Росатом», ПАО «Транснефть», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпромнефть».

Вполне понятна потребность указанных компаний во внесении в сметно-нормативную базу сметных нормативов, отражающих технологии, используемые для специальных объектов. Вместе с тем одним из важных факторов, позволивших им произвести разработку большого количества сметных нормативов, является возможность финансирования данных работ за счет собственных средств. При этом организации, финансируемые в большей степени за счет бюджетных средств, находятся в менее выигрышном положении, так как ни в одном из утвержденных нормативных документов прямо не упомянут механизм бюджетного финансирования таких работ отраслевыми органами исполнительной власти (за исключением учреждений Минстроя России). По сути данной проблемы можно сослаться на современные исследования финансовых моделей в Юго-Восточной Азии [13], показывающие значительный разброс результатов финансирования в зависимости от целевых моделей.

Вместе с этим, именно отраслевые органы имеют наиболее эффективный механизм организации работ, так как координируют и осуществляют все необходимые процессы по организации строительства, реконструкции и капитального ремонта, начиная с процессов планирования инвестиций и заканчивая вводом объектов в эксплуатацию. Ведомственные учреждения организуют и проектирование объектов, и их реализацию, что позволяет не только оперативно получать информацию о недостающих сметных нормативах, но и обеспечивать процесс их разработки проектной документацией и объектами для нормативных наблюдений. Темпы строительства как в целом, так и по отдельным работам, находятся под постоянным контролем инжиниринговых структур отраслевого подчинения [14].

Таким образом, при решении вопроса о финансировании можно с уверенностью утверждать, что разработка необходимых сметных нормативов станет возможной в кратчайшие сроки.

Альтернативный путь выхода из сложившейся ситуации — формирование фонда внебюджетных средств, являющегося дополнительным источником финансирования для разработки и актуализации базы. Также необходимо окончательно решить вопрос о возможности наделения ведомственных организаций полномочиями организатора процессов

планирования, формирования и разработки сметных нормативов, при сохранении за Минстроем России роли общего координатора процесса разработки, а также реестродержателя перечня сметных нормативов, подлежащих применению при разработке проектно-сметной документации.

При реализации данного предложения существует опасность столкнуться с недостаточным обеспечением процесса разработки сметных нормативов специализированными организациями и квалифицированными специалистами. Несмотря на достаточно высокий профессиональный уровень специалистов отраслевого звена ценообразования, их практический опыт в большинстве случаев складывается из деятельности в подрядных организациях, службах заказчика или в проектировании. Задачи, стоящие перед разработчиком сметной документации при реализации строительных проектов, часто определяются потребностью экстремума — поиском максимальных или минимальных решений в условиях лимитов средств, договорных цен, конкуренции. При разработке и актуализации сметных нормативов действуют иные принципы, связанные, преимущественно, с практической обоснованностью создаваемого результата. Баланс теории и практики в сметном нормировании в настоящее время смещен в сторону практической экономики, в ущерб базовым знаниям нормирования и технологии производства работ.

В этой связи следует отметить, что в настоящий момент в системах высшего и среднего профессионального образования, а также в системе дополнительного профессионального образования в недостаточном для строительной отрасли объеме осуществляется подготовка специалистов в области нормирования технологических процессов в строительстве, а ее качество в сильной степени зависит от наличия требуемых профессиональных компетенций у преподавателей. Одной из причин, которые привели к такой ситуации, является разрыв связей учебных заведений с производством в отраслях, в которых строительство занимает фондообразующую функцию для собственных нужд отрасли. Для решения данной проблемы профильным учебным заведениям необходимо в более широком объеме включать в учебные планы курс «Нормирование в строительстве» как отдельную дисциплину по направлениям подготовки специалистов «Ценообразование и сметное дело», «Экономика и управление в строительстве», проводить специализированный курс повышения квалификации в рамках дополнительного профессионального образования, а также привлекать к работе преподавателей, имеющих опыт производственной деятельности в строительных организациях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вне зависимости от схем финансирования и организации процессов актуализации сметных нормативов, качественный их уровень является предметом постоянного обсуждения в профессиональном сообществе. От правильной оценки показателя качества зависит выбор методов распределения и выполнения функций сметного нормирования и последующие результаты применения системы сметных нормативов. По мнению авторов, задача оценки качества лучшим способом может быть решена через полноценный механизм применения сметно-нормативной базы на стадиях «инвестиционная заявка — обоснование — проект — торги — реализация». Избрав экономические показатели, характеризующие связь реализации проекта с его замыслом, и построив модель показателя качества, можно оценить отдельные части системы сметного нормирования — отраслевые и территориальные сметные нормативы. Для этого объектом исследования должны служить проекты, составленные преимущественно из работ и затрат, стоимость которых рассчитывается по выбранной группе сборников. Следует отметить, что данный показатель качества имеет, по меньшей мере, два ограничения. Первое состоит в сопоставительном характере оценки базы, т.е. возможна лишь сравнительная оценка. Второе заключается в возможности оценки только в сторону снижения сметной стоимости строительства вследствие того, что при стабильном завышении сметной стоимости выбранные факторы достигают предельных значений. Для формирования результирующего показателя качества были отобраны следующие факторы.

1. Коэффициент тендерного снижения $K_{\text{тендер}}$ — показатель, характеризующий, насколько сокращается начальная максимальная цена лота (контракта) в процессе торгов. Стабильно существующее значительное тендерное снижение цены свидетельствует о наличии фактического запаса стоимости, рассчитываемой на этапе подготовки к торгам по отношению к ожидаемым издержкам исполнителя работ. Поскольку основа расчета начальной максимальной цены — сметно-нормативная база [15], а плановая себестоимость работ подрядчика аккумулирует в значительной степени опыт создания строительной продукции, сравнение осуществляется в системе «норматив — факт», т.е. в классической форме оценки любого сметного норматива:

$$K_{\text{тендер}} = \frac{\Pi_{\text{нм}}}{\Pi_{\text{дог}}},$$

где $\Pi_{\text{нм}}$ — начальная максимальная цена контракта, рассчитываемая до проведения торгов по объек-

ту; $\Pi_{\text{дог}}$ — цена заключенного договора по соответствующему объекту.

Преимущество предлагаемого подхода состоит в значительном обобщении оценки посредством применения множества сметных нормативов к проектным решениям на достаточной выборке объектов.

2. Количество участников торгов $N_{\text{уч}}$ — сопряженный с предыдущим показатель, характеризующий деловую активность подрядных организаций в отраслевом или территориальном срезе подрядного рынка. При стабильном занижении сметной стоимости, рассчитанной по базе и заложенной в начальную максимальную цену контрактов, происходит такое же стабильное, а не волнообразное снижение деловой активности исполнителей работ, возможность данной ситуации предполагается в исследованиях [16, 17].

В соответствии с «Методикой расчета индексов изменения сметной стоимости строительства», утвержденной приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5.06.2019 № 326/пр, при систематических случаях отмены конкурсных процедур по выбору подрядчика для строительства объектов капитального строительства по причине отсутствия претендентов на участие в конкурсе предусматривается переход с прогнозного на расчетный метод расчета индексов. Это подтверждает значимость избранного фактора при анализе качества фрагмента системы сметного нормирования.

3. Доля итогового освоения непредвиденных затрат $D_{\text{нз}}$ — показатель полноты использования лимитов средств, предусмотренных на стадии проекта и покрывающих непредвиденные и дополнительные затраты.

В сводный сметный расчет стоимости строительства включается резерв средств на непредвиденные работы и затраты, предназначенный для возмещения стоимости работ и затрат, потребность в которых возникает в процессе разработки рабочей документации или в ходе строительства в результате уточнения проектных решений или условий строительства в отношении объектов (выполнения видов работ), предусмотренных в утвержденном проекте. Нередкая ситуация в практике реализации проектов — перераспределение средств в пределах лимитов сметной стоимости на стадии рабочей документации. Методически предопределенное предназначение непредвиденных затрат при этом не соблюдается, и они расходуются на покрытие фактически понесенных затрат на материалы, оборудование, компенсацию недостаточной индексации, особенно при применении отраслевых сметных нормативов:

$$D_{\text{нз}} = \frac{\Pi_{\text{нз}}}{O_{\text{нз}}},$$

где $L_{нз}^п$ — лимит непредвиденных затрат в сводном сметном расчете на стадии проектной документации; $O_{нз}$ — объем освоения непредвиденных затрат по обоснованиям, предусмотренным в структуре сводного сметного расчета.

Такой прием позволяет компенсировать недостаток сметных средств, одновременно являясь индикатором достаточности системы «база — индексация» относительно среднеотраслевых фактических затрат на строительство.

4. Доля незавершенных объектов по вине подрядной организации $D_{нр}$ — комплексный показатель, характеризующий трудности в организационной, финансовой, договорной деятельности подрядчика. Как отмечается в работе [18], некачественная проработка проекта и недостаточное финансирование формируют значительную часть случаев незавершенного строительства в России, из чего можно сделать выводы об учитываемых причинах и сроках срывов. Если в условиях плановой экономики при расчете показателя ритмичности учитывались годовые показатели заключенных договоров, комплектации проектной документацией, доли переходящих объектов, то в современных условиях контрольный срок такой продолжительности является завышенным. Принимая во внимание зарубежный опыт в части темпов строительства, описанный в труде [19], и особенности современного строительства в России по договорам с твердой ценой, оптимальным сроком планирования и контроля незавершенной работы следует считать шесть месяцев. Если за этот срок отставание по выполнению строительных работ и монтажу оборудования имеет монотонное приращение, стоимость отстающих от графика приемки работ следует относить к суммарным просроченным лимитам сметной стоимости $\sum C_{пр}$.

$$D_{нр} = \frac{\sum_1^n C_{дог}^{нз}}{\sum_1^n C_{дог}^{пл}},$$

где $\sum_1^n C_{дог}^{нз}$ — стоимость прироста незавершенного строительства по договорам подряда; $\sum_1^n C_{дог}^{пл}$ — стоимость планового объема работ по договорам подряда.

Определяется данная величина на основе сопоставительного анализа графика строительства (в стоимостном представлении) и накопительных ведомостей формы КС-6, отражающих освоение сметной стоимости нарастающим итогом. Сходный метод анализа использован при анализе эффективности работы подрядной организации [20], а с учетом рисков финансовой несостоятельности организации — в работах [21, 22].

Крайний по своему содержанию случай — банкротство подрядных организаций по причине отсутствия возможности завершить строительство объектов из-за низкой сметной стоимости строительства также отмечен в упомянутой Методике расчета индексов изменения сметной стоимости строительства в качестве основания для отказа от прогнозного метода расчета индексов.

Возможно представление критерия качества сметно-нормативной базы K_6 в части достаточности сметных цен для отраслевых и территориальных объектов строительства в виде:

$$K_6 = \frac{-K_{тендер}}{K_{тендер}} K_{вс1} + \frac{N_{уч}}{N_{уч}} K_{вс2} - \frac{D_{нз}}{D_{нз}} K_{вс3} - \frac{D_{нр}}{D_{нр}} K_{вс4},$$

где $K_{тендер}$, $N_{уч}$, $D_{нз}$, $D_{нр}$ — базовые (средние либо нормативные показатели), служащие для арифметического выравнивания слагаемых; $K_{вс1}$, $K_{вс2}$, $K_{вс3}$, $K_{вс4}$ — весовые коэффициенты, присваиваемые слагаемым в связи с различием воздействия факторов на показатель качества.

Поскольку нормативного регулирования рассматриваемых факторов нет, целесообразно задать средние показатели по строительному комплексу или по отрасли, применяя их при всех последующих сравнениях сметно-нормативной базы. Вариант со средними отраслевыми показателями является более простым, при этом не снижающим точности расчетов. На основе данных исследований [23] приняты следующие базовые показатели:

$$K_{тендер} = 0,90; N_{уч} = 1,2; D_{нз} = 0,6; D_{нр} = 0,04.$$

Задача выбора весовых коэффициентов может быть решена разными путями. При рассмотрении классической факторной математической модели, описываемой в терминах прикладных отраслевых задач, выбор аналитического инструментария может быть осуществлен в зависимости от требуемой формы результата и требований к его точности, как это изложено в работе [24]. Учитывая зарубежный опыт факторного анализа в реальных секторах экономики, отраженный в работе [25], при решении обозначенной в статье задачи следует отдать предпочтение методам парной корреляции [26]. Однако, как отмечается в работах общетеоретической направленности [27], верифицируемая взаимосвязь реальных факторов в модели не означает наличия такой же взаимосвязи на практике. По этой причине приоритетным выбором в деле подбора весовых коэффициентов для процессов с массовым участием специалистов является экспертный метод. По опыту оценки реализации инфраструктурных проектов первичным звеном оценки может являться произвольный метод количественного анализа, даже при отсутствии заранее выбранного критерия оценки.

За рубежом к сходным выводам пришел и автор исследования [28], работая с выборками исключений в естественно-научной области.

Распределив экспертную работу на формирование и контроль, как это принято в труде [29], были получены результирующие значения весовых коэффициентов: $k_1 = 3,3$; $k_2 = 6$; $k_3 = 1$; $k_4 = 4$.

В рассматриваемом случае критерий качества будет определяться равенством:

$$K_6 = -3,67K_{\text{тендер}} + 5N_{\text{уч}} - 1,67D_{\text{нз}} - 30D_{\text{пр}}.$$

Отдельно следует отметить и другую, не менее важную проблему, возникающую в результате проведения реформы системы ценообразования в отрасли.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 23.12.2016 № 1452 «О мониторинге цен строительных ресурсов», в котором утверждены правила мониторинга цен строительных ресурсов, информация о ценах на строительные ресурсы должна размещаться в федеральной государственной информационной системе ценообразования в строительстве (ФГИС ЦС). Создание, ведение и развитие ФГИС ЦС поручено ФАУ «Главгосэкспертиза России».

ФГИС ЦС должна позволять не только оптимизировать стоимость строительства, но и создавать основы для повышения стабильности рынка строительства и улучшения конкурентного климата на рынке строительных материалов, стимулирования применения инновационных технологий и импортозамещения в строительстве. Но конечного результата — публикации в ФГИС ЦС цен за годы реализации данной системы в планируемом объеме не достигнуто. Согласно принятому Минстроем России плану мероприятий, момент публикации цен по полному спектру ресурсов перенесен на 2022 г.

Текущий вид справочника, состоящего в основном из справочника юридических лиц — производителей и из справочника — классификатора строительных ресурсов (КСР), не позволяет выполнять расчеты достоверной сметной стоимости объектов строительства ресурсным методом. Алгоритм внесения строительных ресурсов в классификатор, предложенный на сайте ФАУ «Главгосэкспертиза России», предельно усложнен и содержит ряд практических препятствий, с которыми заинтересованная сторона сталкивается при попытке дополнить классификатор.

На сегодняшний день нет исчерпывающего опубликованного в открытом доступе порядка действий, следуя которому возможно осуществить включение строительных ресурсов в классификатор. Это подтверждают многие организации при попытке дополнить классификатор необходимым отраслевым ресурсом. Оказалось, что обязательным условием для размещения наименований строительных материалов, оборудования, машин и механизмов в КСР

служит включение юридического лица в перечень юридических лиц, предоставляющих информацию о ценах. Наличие нового ресурса в проектных решениях, изготовление его на территории РФ и применение «де факто» при производстве работ само по себе не является основанием для изменения классификатора.

На сайте ФГИС ЦС ФАУ «Главгосэкспертиза России» предлагает производителям войти в перечень юридических лиц для включения производимых ими строительных ресурсов в КСР и дальнейшего мониторинга. Для этого необходимо зарегистрироваться на портале ФГИС ЦС или направить обращение в адрес Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ в соответствии с п. 13 Правил мониторинга цен строительных ресурсов, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 23.12.2016 № 1452, через заинтересованные федеральные органы исполнительной власти. Большое количество производителей строительных материалов просят упростить процесс дополнения КСР данными о выпускаемой ими продукции, так как в силу различных причин не могут пройти весь путь самостоятельно. Политика мониторинга цен в данной ситуации сталкивается с теми же проблемами качества и количества исходной информации, что и при эмпирической оценке затрат [30].

Например, при попытке, произведенной совместно с производителем, самостоятельно зарегистрироваться как юридическое лицо, предоставляющее информацию о ценах, совершенной в соответствии с инструкцией по авторизации на портале государственных услуг, которая размещена на сайте ФАУ «Главгосэкспертиза России», портал выдает ошибку — «организация отсутствует в перечне юридических лиц». То есть зарегистрироваться невозможно, при том, что указанная организация на самом портале уже зарегистрирована.

Одновременно с этим, Минстроем России сформирован перечень юридических лиц, которые должны будут ежеквартально предоставлять информацию, необходимую для формирования сметных цен строительных ресурсов в ФГИС ЦС, который на начало 2020 г. составлял порядка десяти тысяч организаций. Очевидно, что такое количество организаций не могут обеспечить сведениями для формирования цен на строительные ресурсы в разрезе всех субъектов РФ по всему количеству и номенклатуре ресурсов, которые на сегодня имеются в КСР, а это более 120 000 строительных ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В практике ведения мониторинга цен в настоящее время существует две задачи сбора и обработки фактических данных о ценах строительных ресурсов:

- обеспечение сметно-нормативной базы необходимым блоком данных для возможности использования ресурсного метода;

- формирование обосновывающих материалов для расчета индексов изменения сметной стоимости, рассчитываемой по единичным расценкам.

Несмотря на представленную классификацию, детальное формулирование задач и методы их решения во многом сходны и взаимозаменяемы. Сходны и требования основных документов, регламентирующих мониторинг — Постановление Правительства РФ от 23.12.2016 № 1452 и приказа Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 05.06.2019 № 326/пр. В связи с тем, что указанные нормативно-правовые акты действуют сравнительно недавно, а мониторинг цен строительных ресурсов в современном понимании ведется уже порядка двадцати лет, существует проблема актуализации номенклатуры ресурсов не только в сметных нормативах, но и в ресурсно-технологических моделях расчета индексов. Будучи сформированными при введении сметно-нормативной базы 2001 г., ресурсно-технологические модели расчета были наполнены ресурсами, учтенными в проектной документации тех лет, либо еще более ранней. Некоторая часть ресурсов при включении в модели подверглась обобщению, что на протяжении длительного срока вносило неточность в разрабатываемые индексы. Например, позиция 441-1547-001 «Блок железобетонный насадок, откосных стенок, фундаментов, лотков из бетона класса В30, W6, F300» содержит избыточное уточнение по характеристике материала, однако данному наименованию может соответствовать несколько десятков одних только типовых марок железобетонных изделий. Аналогичная ситуация с позицией 507-0546 «Трубы полиэтиленовые низкого давления (ПНД) с наружным диаметром 110 мм», когда для правильного определения стоимости необходимо уточнять марку и назначение трубы в проектной документации. Это не дает однозначного указания на цену при решении вопроса выбора ресурса в прейскурантах производителей. Как правило, выбирается любой ресурс из прейскуранта, причем фиксация выбора либо усреднение цен не предусмотрены действующими методическими документами. При ежеквартальном анализе рынка «любая» позиция с большой долей вероятности не повторяется, что приводит к произвольному колебанию значения индекса на данный материал. Мнение о том, что ошибка в данном случае аналогична ошибке использования материала в локальной смете применительно к проекту, не находит подтверждения. В основе сопоставления вероятностных величин лежит сравнение их дисперсий. Дисперсия стоимости материала при составлении

локальной сметы стационарна и определяется целиком проектным решением, его несовпадением с ресурсным набором сметной нормы. Независимо от величины ошибки, причина ее непосредственно зависит от состава ведомости объемов работ, а не от качества сметного нормирования. При выполнении мониторинга дисперсия цены материала находится в зависимости от человеческого фактора, ограничиваясь лишь пределами цен в границах обобщения названия позиции. Важно учитывать, что все экономические задачи имеют значительную зависимость от разброса исходных данных, поскольку экспериментальный метод их решения чаще всего невозможен.

Наличие устаревших строительных материалов не только в сметных нормативах, но и в моделях расчета индексов, затрудняет достоверное определение стоимости. Пример тому — позиция 204-0012 «Горячекатаная арматурная сталь периодического профиля класса А-П», фигурировавшая в старых проектах и включенная в модель расчета индексов. В условиях замены ее на сталь более высокой марки, при сборе данных для мониторинга вносится неопределенность, связанная с отсутствием учета механических свойств арматуры при выборе ее сечения. Это определяет объемную ошибку дополнительно к ценовой.

В настоящий момент последовательно решаются задачи приведения номенклатуры ресурсов в моделях мониторинга цен в отраслях параллельно с введением общего классификатора ресурсов.

В связи с тем, что мониторинг цен строительных ресурсов является одним из самых важных инструментов определения достоверной стоимости строительства на этапе не только строительства, но и планирования инвестиций, отсутствие цен в ФГИС ЦС снижает точность определения лимитов средств на строительство наряду с отсутствием четко проработанной системы подачи информации производителями и отсутствием возможности учета цен от поставщиков.

На сегодняшний день ФАУ «Главгосэкспертиза России» в целях формирования индексов изменения сметной стоимости обобщает сведения о результатах мониторинга цен субъектами РФ не по всем необходимым позициям ресурсов, большая часть которых не представлена в том или ином субъекте РФ, поэтому представляется целесообразным расширение номенклатуры ресурсов, по которым проводится мониторинг цен, с обязательным включением в нее ценообразующих материалов для отраслевого строительства. Поскольку в состав специализированных отраслевых ресурсов в ряде случаев включаются распространенные общестроительные виды ресурсов, схема с перекрестной межотраслевой схемой мониторинга по таким ресурсам — наиболее эффективна.

Не менее важным является вопрос определения величины индекса изменения сметной стоимости в строительстве, который длительное время принимался по статье «Прочие объекты» в связи с отсутствием отраслевого индекса «Автомобильные дороги». Применение этого индекса к стоимости строительно-монтажных работ существенно искажало их стоимость в текущем уровне цен. Методика расчета индексов изменения сметной стоимости строительства, утвержденная приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 05.06.2019 № 326/пр, устанавливает единый состав и порядок формирования исходных данных как для разработки индексов изменения сметной стоимости строительных и монтажных работ, так и для индексов изменения по статьям затрат (оплаты труда рабочих-строителей, стоимости эксплуатации машин и механизмов, стоимости материалов изделий и конструкций). Таким образом, для опубликования индексов изменений по статьям затрат нет формальных сдерживающих факторов. Применение данных индексов приведет к более точному определению сметной стоимости строительства, а также к более точному определению стоимости каждой конкретной работы, что впоследствии положительно повлияет на оценку стоимости фактически выполненных работ подрядной организацией при взаиморасчетах с заказчиком.

Безусловный шаг вперед в направлении расширения номенклатуры используемых индексов — разработка и утверждение в 2019 г. двух новых индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ: «Автомобильные дороги» и «Искусственные дорожные сооружения», как пример расширения номенклатуры индексов в отраслевом сегменте.

Учитывая, что принятый Минстроем России очередной новый план реформирования системы ценообразования предполагает проведение подготовительных мероприятий для перехода на ресурсный метод составления смет до 2022 г., задача изучения опыта методологии ценообразования в строительстве в зарубежных странах позволит лучше понять достоинства и недостатки существующей в настоящее время российской методологии ценообразования.

Зарубежная (европейская, американская) система сметного нормирования формировалась в течение длительного времени в свободных, не регулируемых государством условиях формирования договорной цены на строительную продукцию. Эта система достаточно полно соответствует потребностям строительного рынка, что подтверждается ее живучестью. Так как Россия идет по пути рыночных отношений, то логично было бы использовать соответствующий, именно рыночный опыт формирова-

ния цены строительной продукции. К сожалению, тенденции развития сметного нормирования в нашей стране направлены на продление существования административного ценообразования, при котором цены на строительную продукцию являются не рыночным индикатором, рекомендуемым к самостоятельному применению участниками строительного рынка, а средством правового регулирования в инвестиционной сфере.

Проведенный авторами анализ зарубежного опыта разработки сборников сметных цен, а также специфики их применения в странах с комбинированной экономикой и достаточно высоким уровнем развития производства, позволит сделать определенные выводы относительно адекватности отечественной системы ценообразования современным рыночным условиям хозяйствования. На основе сопоставления практики формирования сметной цены за рубежом и в России появится возможность сформулировать предложения, которые могут быть актуальными для отечественной отраслевой экономики и иметь право на рассмотрение в качестве перспективных путей ее реформирования. Такие предложения сформулированы следующим образом:

1. Возможен иной подход группировки сметной стоимости на уровне расценок. Есть возможность включения в единичные стоимостные показатели накладных расходов и прибыли, относящихся к подрядчику. По сути, подразумевается возможность расширения состава работ с образованием комплексных расценок.

2. Существуют предпосылки для сокращения номенклатуры тарифной классификации труда. По крайней мере, за рубежом удастся обойтись меньшим числом тарифных разрядов.

3. Уровень соответствия сборников технологическому развитию строительства за рубежом выше. Устаревших работ и технологий меньше, а актуализация проводится чаще. Это может служить ориентиром для отечественного сметного нормирования. Одним из существенных недостатков расчета сметной стоимости строительства является отсутствие учета как факторов, связанных с внедрением научно-технического прогресса, так и иных экономических факторов, связанных с конъюнктурой рынка. Использование в строительном комплексе новых технологий, строительных машин и механизмов, инновационных материалов отражается на сметной стоимости строительства с большим опозданием в силу несвоевременности разработки необходимых сметных нормативов.

4. Зарубежный опыт подсказывает целесообразность исключения из норм требований к техническим характеристикам используемой техники — грузоподъемности крана, грузового автомобиля,

объему ковша экскаватора и т.п. Выбор марки машины осуществляет подрядчик самостоятельно, исходя из имеющихся либо арендуемых единиц. В отечественной практике это приводит к ненужным попыткам замены ресурсов в расценках. Если технические характеристики техники укрупнить, это будет иметь экономический (стимулирующий), а не нормативный (директивный) смысл. Также нецелесообразно деление орудий труда на отечественные и импортные. Это имело смысл в советское время, когда промышленностью нашей страны была в целом освоена номенклатура строительных машин. В условиях деградации отечественного производства импортная техника становится вынужденной реальностью.

5. Разделение сметных нормативов на укрупненные, используемые на предпроектном этапе, и элементные, необходимые при проектировании, является общей закономерностью отечественного и зарубежного ценообразования. Исключительно ценное направление в отечественном сметном нормировании — создание нормативов цены конструктивных решений (НЦКР), по сути, являющихся комплексными расценками, позволяет решать задачи на всех этапах реализации инвестиционного проекта. На предпроектной стадии НЦКР восполняют пробелы в номенклатуре нормативов цены строительства. Это справедливо, в особенности, для специализированных объектов отраслевого строительства. На стадии разработки проектной и рабочей документации формирование сметной стоимости НЦКР снижает трудоемкость разработки смет, упрощая подготовку ведомости твердых договорных цен и контроль за выполнением работ подрядчиком.

6. Склонность американской и французской сметно-нормативной базы к разработке «закрытых» расценок определяется доступностью информации о сметной стоимости материалов и возможностью ее обобщения по территориальному признаку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводя итог исследования, следует отметить, что достижение поставленной цели повышения достоверности определения сметной стоимости строительства возможно не только при условии решения

традиционных задач ценообразования. Ожидаемый переход к ресурсному методу составления смет обозначил острые проблемы — мониторинг цен строительных ресурсов и индексацию стоимости в переходном периоде. Приведенный в статье анализ зарубежного ценообразования в очередной раз подтверждает необходимость использования рыночных технологий формирования нормативов в условиях современной экономики, исключая фактор государственного правового регулирования цен.

Отвечая на вопрос об общем уровне сметной стоимости реализуемых проектов, предложен метод оценки качества сегментов сметно-нормативной базы, основанный на анализе реализации инвестиционных проектов. Учет показателей активности на стадии подрядных торгов наряду с мерой достаточности сметной стоимости в процессе освоения сметной стоимости позволяет получать показатели качества отдельно для разных типов объектов, а также комплексов специализированных работ. Наибольшее практическое значение данное предложение имеет для осуществляемых в настоящее время процессов гармонизации сметных нормативов. С его помощью могут приниматься решения о степени достаточности и достоверности нормативных показателей стоимости при включении их в федеральный реестр, а также о возможности корректировки сметных нормативов в период перехода к ресурсному методу.

Наиболее перспективные шаги по совершенствованию системы ценообразования, по мнению авторов, состоят в развитии системы мониторинга цен строительных ресурсов, постоянном дополнении системы новыми видами строительных ресурсов, появляющимися на рынке в силу высоких темпов научно-технического прогресса. В условиях полного государственного регулирования стоимости через систему нормативов вторым (после торгов) значимым рыночным рычагом воздействия на цену продукции является мониторинг. Исследования, связанные с обработкой результатов мониторинга для целей сметного нормирования, управлением рыночными факторами и рисками воздействия на ценовые показатели, должны в предстоящие годы стать важной составляющей прикладной строительной экономики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ардзинов В.Д. Проблемы и риски реформирования ценообразования и сметного нормирования в строительстве // Управление рисками в экономике: проблемы и решения: труды научно-практи-

ческой конференции с международным участием РИСК'Э-2018 / под ред. С.Г. Опарина. 2018. С. 353–363. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id19-52

2. Соловьев В.В., Корчагин А.П. Пути повышения качества предпроектной деятельности в ОАО «РЖД» // Экономика железных дорог. 2014. № 3. С. 21–26.
3. Баширов А.Е., Рубченко Д.С., Курбацкая Е.П. О ценообразовании при строительстве объектов железнодорожного транспорта // Экономика железных дорог. 2012. № 6. С. 34.
4. Соловьев В.В. Экономические показатели использования машин в строительстве // Вестник Московской международной высшей школы бизнеса МИРБИС. 2019. № 1 (17). С. 184–194. DOI: 10.25634/MIRBIS.2019.1.22
5. Соловьев В.В., Кузнецова А.Э. Моделирование стоимостных нормативов для объектов железнодорожного строительства // Экономика железных дорог. 2016. № 12. С. 44–51.
6. Соловьев В.В. Отраслевые особенности определения укрупненных показателей стоимости строительства // Экономика железных дорог. 2016. № 6. С. 46–53.
7. Ваганова М.Д., Щербакова Н.А. Процесс перехода на новую сметно-нормативную базу в строительстве // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (Поиск). 2019. № 1–2. С. 158–161.
8. Полтава А.В., Корчагин А.П. Проблемы определения достоверной стоимости строительства в рамках управления проектами // Развитие методологии современной экономической науки, менеджмента и образования в условиях информационно-цифровых трендов : мат. III Междисциплинарной Всеросс. науч. конф. 2019. С. 208–213.
9. Мищенко А.С. Проблемы сметно-нормативной базы и ценообразования в строительстве // В мире научных открытий : мат. III Междунар. студ. науч. конф. 2019. С. 87–89.
10. Cheng Y., Hu H. Analysis of the problems, causes and countermeasures in the brand construction of the postgraduate entrance examination institutions // Open Journal of Business and Management. 2020. Vol. 08. Issue 02. Pp. 396–413. DOI: 10.4236/ojbm.2020.82025
11. Donnelly S., Verkuilen J. Empirical logit analysis is not logistic regression // Journal of Memory and Language. 2017. Vol. 94. Pp. 28–42. DOI: 10.1016/j.jml.2016.10.005
12. Ping Y. Analysis of the influence of multiple linear regression on construction price // Statistics and Application. 2020. Vol. 09. Issue 01. Pp. 19–25. DOI: 10.12677/sa.2020.91003
13. Chen S.D., Lim A.E.B. A Generalized black-litterman model // Operations Research. 2020. 97 p. DOI: 10.1287/opre.2019.1893
14. Yu Zhang, Dangqiang Yin, Yating Zhu. Method for construction progress measurement for EPC oil and gas pipeline projects // Journal of Oil and Gas Technology. 2019. Vol. 41. Issue 06. Pp. 130–132. DOI: 10.12677/jogt.2019.416110
15. Соловьева Е.В., Теунаева Ф.С., Ханаев Т.И. Современные подходы к разработке сметной документации на основе новой сметно-нормативной документации и федеральной государственной информационной базы // Экономика и предпринимательство. 2019. № 2 (103). С. 905–913.
16. Силка Д.Н., Бабаева М.С. Способы повышения качества и эффективности взаимоотношений участников инвестиционно-строительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2018. № 1 (90). С. 682–685.
17. Силка Д.Н. Ключевые факторы для выделения фаз цикла деловой активности в строительстве // Вестник университета. 2011. № 21. С. 210–212.
18. Хуснутдинова К.М., Бикметов Р.Ш. Проблемы, возникающие при незавершенном строительстве, и пути их решения // Новости науки 2019 : сб. мат. VIII-й междунар. оч.-заоч. науч.-практ. конф. 2019. С. 136–139.
19. Mathar H., Assaf S., Hassanain M.A., Abdallah A., Sayed A.M.Z. Critical success factors for large building construction projects: Perception of consultants and contractors // Built Environment Project and Asset Management. 2020. Vol. 9. Issue 5. Pp. 29–33. DOI: 10.1108/BEPAM-07-2019-0057
20. Ir Shamsuddin Sabri, Ir Mohd Erie Husairrie Ismail, Mohd Nazri Ali, Rohayu Abd Aziz Roads. Towards better road contractor performance ranch // Public Works Department (PWD). Malaysia, 2020. Preprint No. 2394.
21. Adamko P., Chutka J. Company bankruptcy and its prediction in conditions of globalization // SHS Web of Conferences. 2020. Vol. 74. P. 05002. DOI: 10.1051/shsconf/20207405002
22. Bhutta R., Regupathi A. Predicting corporate bankruptcy: lessons from the past // Asian Journal of Multidisciplinary Studies. 2020. Vol. 8 (1). Pp. 13–21.
23. Тихонова Е.А. Организация подрядных торгов (конкурсов) на объекты и услуги в строительстве // Молодой ученый. 2019. № 4 (242). С. 261–264.
24. Чистякова А.П. Значение факторного анализа в условиях оценки финансового положения коммерческого предприятия // Молодой ученый. 2019. № 6 (244). С. 156–158.
25. Medhat Mahmoud, Thore Egeland, Theo Meuwissen. Genotype imputation based on discriminant and cluster analysis // Conference: Interbull bulletin. Berlin, Germany, 2014. Vol. 48.
26. Kao L.-J., Lee C.-F., Tai T. Discriminant analysis and factor analysis: theory and method // Handbook of Financial Econometrics and Statistics. 2014. Pp. 2461–2476. DOI: 10.1007/978-1-4614-7750-1_89
27. Аргаманова А.А. Взгляды М. Вебера и Р. Мертон на природу научных ценностей // Ценности и смыслы. 2019. № 5 (63). С. 65–81. DOI: 10.24411/2071-6427-2019-10087
28. Thornton J., Fadl H.E., Walker K.F., Torgerson D. Avoiding biased exclusions in cluster

trials // Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica. 2020. Vol. 99. Issue 2. Pp. 145–146. DOI: 10.1111/aogs.13776

29. Khandelwal S., Kumar D. Computational fact validation from knowledge graph using structured and unstructured information // Proceedings of the 7th ACM

IKDD CoDS and 25th COMAD. 2020. Pp. 204–208. DOI: 10.1145/3371158.3371187

30. Niu Zilong. Essays in Empirical Asset Pricing and International Finance CentER: Dissertation Series, Research Group: Finance, Center Ph.D. 2020. Vol. 618. 118 p.

Поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Вячеслав Владимирович Соловьев — кандидат экономических наук, доцент, ведущий инженер службы методологии ценообразования и мониторинга цен на строительные ресурсы; **Дирекция по комплексной реконструкции железных дорог и строительству объектов железнодорожного транспорта — филиал ОАО «РЖД» (ДКРС ОАО «РЖД»);** 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13. стр. 16; РИНЦ ID: 440293, ORCID: 0000-0002-6563-7630; s35681@yandex.ru;

Алексей Павлович Корчагин — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5966-5640, РИНЦ ID: 352474; korchaginap@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Ardzinov V.D. Problems and risks of reforming pricing and budget rationing in construction. *Proceedings of the scientific and practical conference with international participation RYASKE-2018. Edited by S.G. Oparin.* 2018; 353-363. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id19-52 (rus.).

2. Solov'ev V.V., Korchagin A.P. Ways to improve the quality of pre-project activities in Russian Railways. *Economy of Railways.* 2014; 3:21-26. (rus.).

3. Bashirov A.E., Rubchenko D.S., Kurbackaya E.P. About pricing in the construction of railway facilities. *Economy of Railways.* 2012; 6:34. (rus.).

4. Solov'ev V.V. Economic indicators of the use of machines in construction. *Bulletin of the Moscow international higher school of business MIRBIS.* 2019; 1(17):184-194. DOI: 10.25634/MIRBIS.2019.1.22 (rus.).

5. Solov'ev V.V., Kuznecova A.E. Modeling of cost standards for railway construction objects. *Economy of Railways.* 2016; 12:44-51. (rus.).

6. Solov'ev V.V. Branch features of definition of integrated indicators of construction cost. *Economy of Railways.* 2016; 6:46-53. (rus.).

7. Vaganova M.D., Shcherbakova N.A. The process of transition to a new budget and regulatory framework in construction. *Young scientists — development of the National technology initiative (Search).* 2019; 1-2:158-161. (rus.).

8. Poltava A.V., Korchagin A.P. Problems of determining the reliable cost of construction in the framework of project management. *Development of the methodology of modern economic science, management*

and education in the context of information and digital trends: materials of the III Interdisciplinary all-Russian scientific conference. 2019; 208-213. (rus.).

9. Mishchenko A.S. Problems of budget and regulatory framework and pricing in construction. *In the world of scientific discoveries: materials of the III international student scientific conference.* 2019; 87-89. (rus.).

10. Cheng Y., Hu H. Analysis of the problems, causes and countermeasures in the brand construction of the postgraduate entrance examination institutions. *Open Journal of Business and Management.* 2020; 08(02):396-413. DOI: 10.4236/ojbm.2020.82025

11. Donnelly S., Verkuilen J. Empirical logit analysis is not logistic regression. *Journal of Memory and Language.* 2017. 94:28-42. DOI: 10.1016/j.jml.2016.10.005

12. Ping Y. Analysis of the Influence of Multiple Linear Regression on Construction Price. *Statistics and Application.* 2020; 09(01):19-25. DOI: 10.12677/sa.2020.91003

13. Chen S.D., Lim A.E.B. A Generalized Black-Litterman Model. *Operations Re-search.* 2020; 97. DOI: 10.1287/opre.2019.1893

14. Yu Zhang, Dangqiang Yin, Yating Zhu. Method for construction progress measurement for EPC oil and gas pipeline projects. *Journal of Oil and Gas Technology.* 2019; 41(06):130-132. DOI: 10.12677/jogt.2019.416110

15. Solov'eva E.V., Teunaeva F.S., Hapaev T.I. Modern approaches to the development of estimates on the basis of new estimates and regulatory documentation

and the federal state information base. *Economy and entrepreneurship*. 2019; 2(103):905-913. (rus.).

16. Silka D.N., Babaeva M.S. Ways to improve the quality and efficiency of relationships between participants in investment and construction activities. *Economy and entrepreneurship*. 2018; 1(90):682-685. (rus.).

17. Silka D.N. Key factors for identifying the phases of the business cycle in construction. *Bulletin of the University*. 2011; 21: 210-212. (rus.).

18. Husnutdinova K.M., Bikmetov R.Sh. Problems arising during incomplete construction, and ways to solve them. *Science news 2019: collection of materials of the VIII-th international full-time scientific and practical conference*. 2019; 136-139. (rus.).

19. Mathar H., Assaf S., Hassanain M.A., Abdallah A., Sayed A.M.Z. Critical success factors for large building construction projects: Perception of consultants and contractors. *Built Environment Project and Asset Management*. 2020; 9(5):29-33. DOI: 10.1108/BEPAM-07-2019-0057

20. Ir Shamsuddin Sabri, Ir Mohd Erie Husairrie Ismail, Mohd Nazri Ali, Rohayu Abd Aziz Roads. Towards better road contractor performance ranch. *Public Works Department (PWD)*. Malaysia, 2020. Preprint No. 2394.

21. Adamko P., Chutka J. Company bankruptcy and its prediction in conditions of globalization. *SHS Web of Conferences*. 2020; 74:05002. DOI: 10.1051/shsconf/20207405002

22. Bhutta R., Regupathi A. Predicting corporate bankruptcy: lessons from the past. *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 2020; 8(1):13-21.

23. Tihonova E.A. Organization of contract auctions (competitions) for objects and services in construction. *Young Scientist*. 2019; 4(242):261-264. (rus.).

24. Chistyakova A.P. Value of factor analysis in assessing the financial position of a commercial enterprise. *Young Scientist*. 2019; 6(244):156-158. (rus.).

25. Mahmoud M., Egeland T., Meuwissen T. Genotype imputation based on discriminant and cluster analysis. *Conference: Interbull bulletin*. Berlin, Germany, 2014; 48.

26. Kao L.-J., Lee C.-F., Tai T. Discriminant analysis and factor analysis: theory and method. *Handbook of Financial Econometrics and Statistics*. 2014; 2461-2476. DOI: 10.1007/978-1-4614-7750-1_89

27. Argamakova A.A. Views of M. Weber and R. Merton on the nature of scientific values. *Values and Meanings*. 2019; 5(63):65-81. DOI: 10.24411/2071-6427-2019-10087 (rus.).

28. Thornton J., Fadl H.E., Walker K.F., Torgerson D. Avoiding biased exclusions in cluster trials. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica*. 2020; 99(2):145-146. DOI: 10.1111/aogs.13776

29. Khandelwal S., Kumar D. Computational Fact Validation from Knowledge Graph using Structured and Unstructured Information. *Proceedings of the 7th ACM IKDD CoDS and 25th COMAD*. 2020; 204-208. DOI: 10.1145/3371158.3371187

30. Niu Zilong. Essays in empirical asset pricing and International Finance CenterER: Dissertation Series, Research Group: Finance, Center Ph.D. 2020; 618:118.

Received February 10, 2020.

Adopted in a revised form on March 2, 2020.

Approved for publication March 29, 2020.

BIONOTES: Vyacheslav V. Solov'ev — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, leading engineer of the service of pricing methodology and monitoring of prices for construction resources; **Directorate for complex reconstruction of Railways and construction of railway transport facilities-branch of JSC "Russian Railways"**; build. 16, 13 Perevedenovsky lane, Moscow, 105082, Russian Federation; RISC ID: 440293, ORCID: 0000-0002-6563-7630; s35681@yandex.ru;

Alexey P. Korchagin — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and management in construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5966-5640, RISC ID: 352474; korchaginap@mgsu.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Вionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Форма № ПД-4	
<p>Извещение</p> <p>Кассир</p>	<p>УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001</p> <p style="text-align: center; font-size: small;">(наименование получателя платежа)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</div> </div> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)</p> <p>в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 4 4 5 2 5 0 0 0</div></p> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(наименование банка получателя платежа)</p> <p>КБК <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</div></p> <p>ОКТМО <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4 5 3 6 5 0 0 0</div></p> <p>Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 60%; text-align: center;"> <p style="font-size: x-small;">(наименование платежа)</p> <p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;"> <p>Вестник МГСУ</p> <p style="font-size: x-small;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>Сумма</p> <p>платежа <u>6 880</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.</p> <p style="font-size: x-small;">С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p> <p style="text-align: right;">Подпись _____</p> <p style="text-align: right; font-size: x-small;">плательщика</p> </div>
	<p style="text-align: right; font-size: small;">Форма № ПД-4</p> <p>УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001</p> <p style="text-align: center; font-size: small;">(наименование получателя платежа)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</div> </div> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)</p> <p>в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 4 4 5 2 5 0 0 0</div></p> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(наименование банка получателя платежа)</p> <p>КБК <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</div></p> <p>ОКТМО <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4 5 3 6 5 0 0 0</div></p> <p>Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 60%; text-align: center;"> <p style="font-size: x-small;">(наименование платежа)</p> <p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;"> <p>Вестник МГСУ</p> <p style="font-size: x-small;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>Сумма</p> <p>платежа <u>6 880</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.</p> <p style="font-size: x-small;">С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p> <p style="text-align: right;">Подпись _____</p> <p style="text-align: right; font-size: x-small;">плательщика</p> </div>

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/>

