

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 1/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 1
2020**

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

Сквозной номер 136

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 1
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	24.01.2020.
Подписан в свет	31.01.2020.

Формат 70×108/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 14,7. Уч.-изд. л. 21.
Заказ № 13

Знаком информационной продукции не маркируется.

© ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 2020

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

Евгений Валерьевич Королев, д-р техн. наук, проф., временно исполняющий обязанности ректора, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Елена Анатольевна Король, чл.-корр. Российская академия 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. Российская академия 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

Координатор журнальных проектов

Ирина Сергеевна Сковородина

Научные редакторы рубрик

Вячеслав Сергеевич Семенов,

Ашот Георгиевич Тамразян,

Александр Николаевич Белкин

Зав. редакцией

Лидия Александровна Шитова

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова,

Эмилия Борисовна Нетунаева

Редактор-корректор

Анна Александровна Дядичева

Дизайн и верстка

Александр Петрович Сильванович

Перевод на английский язык

Татьяна Владимировна Бердникова

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

Редакционный совет

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

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

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

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

Наталья Григорьевна Верстина, д-р экон. наук, проф., проректор (дополнительное профессиональное образование), зав. каф. менеджмента и инноваций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI—MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	24.01.2020

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, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Journal coordinator

Irina S. Skovorodina

Scientific editors sections

Vyacheslav S. Semenov,

Ashot G. Tamrazyan,

Alexander N. Belkin

Managing editor

Lidiya A. Shitova

Editors

Tat'yana V. Berdnikova,

Emiliya B. Netunaeva

Corrector

Anna A. Dyadicheva

Layout

Alexander Silvanovich

Russian-English translation

Tat'yana V. Berdnikova

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

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

В.И. Теличенко

Реновация — создание современной городской среды. 11

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

А.Г. Тамразян, А.В. Алексейцев

**Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий
и сооружений. 12**

А.И. Фаттахова

**Влияние горизонтальных нагрузок на работу стад-болтов в комбинированных плитах
перекрытия 31**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Т.А. Бахтина, Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, В.В. Николаенко

**Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного
твердения за счет принудительной карбонизации 43**

Е.И. Королев, Е.Н. Сычкина, А.Б. Пономарев

Исследование стабилизации мергеля органическими вяжущими 58

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.И. Теличенко, В.М. Ройтман

**Анализ причин и последствий крупных чрезвычайных ситуаций с целью обеспечения
комплексной безопасности зданий и сооружений 72**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.А. Гебрехивот, Д.В. Козлов

**Статистическая и пространственная изменчивость климатических данных в бассейне
реки Марек-Гаш в Эритрее (на английском языке) 85**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.В. Каракозова, Г.Г. Малыха, А.С. Павлов, А.С. Панин, Н.Д. Теслер

**Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере
проектирования медицинских организаций 100**

Э.С. Цховребов

**Ресурсосбережение: основные этапы становления, теории и методы, тенденции и перспективы
развития в промышленности и строительной индустрии России 112**

Требования к оформлению научной статьи. 159

CONTENTS

CHIEF EDITOR COLUMN

V.I. Telichenko

Renovation — creating modern urban environment	11
---	-----------

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BUILDING SYSTEMS. STRUCTURAL MECHANICS. FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev

Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures	12
--	-----------

Alsou I. Fattakhova

Impact of horizontal loads on the work of stud bolts in combined floor slabs	31
---	-----------

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Tamara A. Bakhtina, Nikolay V. Lyubomirskiy, Aleksandr S. Bakhtin, Vitaliy V. Nikolaenko

Obtaining construction materials based on the dolomite lime of accelerated forced-carbonization hardening	43
--	-----------

Egor I. Korolev, Evgeniya N. Sychkina, Andrey B. Ponomaryov

Study of marl stabilization with organic binders	58
---	-----------

CONSTRUCTION AND URBAN SAFETY

Valery I. Telichenko, Vladimir M. Roitman

A cause-and-consequence analysis of serious emergencies with the aim of providing integrated safety of buildings and installations	72
---	-----------

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Anghesom A. Ghebrehiwot, Dmitry V. Kozlov

Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea	85
---	-----------

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Irina V. Karakozova, Galina G. Malykha, Alexander S. Pavlov, Andrey S. Panin, Nadezhda D. Tesler

Study of preparatory activities on using BIM-technologies in the medical enterprise design	100
---	------------

Eduard S. Tshovrebov

Resource-saving: main formation stages, theories and methods, tendencies and prospects of development in industry and construction of Russia	112
---	------------

Requirements for research paper design	159
---	------------

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15. Выпуск 1, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15. Issue 1, 2020

Цели, задачи и тематика журнала. Редакционная политика

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

Aims and Scope. Editorial Board Policy

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

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

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

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

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

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

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Реновация — создание современной городской среды

Renovation — creating modern urban environment

В 2017 году в г. Москве приступили к реализации масштабной программы реновации жилого фонда. Использование термина «реновация» подчеркивает ее системный многоцелевой характер. Цели реновации:

- социальная, направленная на улучшение условий жизни более миллиона жителей города;
- градостроительная, в основе которой лежит стремление не просто снести или реконструировать устаревшие, выработавшие свой ресурс здания, а реализовать системный подход к формированию и развитию современной городской среды;
- инфраструктурная, заключающаяся в обновлении и модернизации инженерной инфраструктуры не только домов, подлежащих реновации, но и городских районов;
- инновационная, направленная на развитие новых форм участия жителей в решении масштабных городских проектов, освоении информационных технологий управления жилыми зданиями, применения BIM-технологий, стандартов «зеленого» строительства, безотходных технологий в системе ЖКХ.

В Программу реновации жилья в Москве включены 5173 дома — это примерно 350 тыс. квартир общей площадью 16,4 млн кв. м. Всего жилой фонд г. Москвы составляет 250 млн кв. м. Предварительный объем финансирования программы находится в диапазоне 3–3,5 трлн руб.

Начальный этап Программы связан с решением большого количества градостроительных проблем. Прежде всего это выбор так называемых «стартовых» площадок в районах города, где можно было бы построить многоквартирный дом для создания первой «волны» переселения.

Не в каждом районе Москвы можно легко найти и обосновать с позиций соответствия градостроительным нормативам такие площадки. Жители домов, включенных в Программу реновации, внимательно следят за этим процессом, так как понимают, что от правильности выбора места расположения дома будут во многом зависеть их условия проживания.

Особенно жителей волнуют такие параметры зданий, как высотность, инсоляция, возможность



создания социальной инфраструктуры, качество дворовой территории. Все эти вопросы должны быть решены на стадии разработки проекта планировки территории.

Подготовленные проектировщиками решения обсуждаются совместно с жителями в рамках проведения публичных слушаний, что является обязательным и очень важным этапом в ходе принятия градостроительных решений.

В конечном счете реализация Программы реновации жилья в Москве должна служить не только целям переселения жителей города в современные дома, но и способствовать развитию города, созданию современной комфортной и безопасной городской среды.

*Главный редактор В.И. Теличенко,
президент НИУ МГСУ, доктор технических наук, профессор, академик РААСН,
член Общественной палаты города Москвы*

*Editor-in-Chief Valery I. Telichenko,
Academician, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Member of the Public Chamber of Moscow,
Moscow, Russian Federation*

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

УДК 692

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30

Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений

А.Г. Тамразян, А.В. Алексейцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Осуществлен обзор современных подходов к поиску оптимальных по различным критериям конструктивных решений для несущих строительных конструкций. Раскрыта проблематика поиска решений на дискретных множествах варьируемых параметров, отражающая современные подходы к проектированию с учетом доступной номенклатуры материалов и изделий. Сформулированы цели литературного обзора, его актуальность для современных социально-экономических условий, проведен краткий исторический экскурс, отражающий этапы развития поисковых методов. Основное внимание уделено новым метаэвристическим подходам, которые используются в мировой практике для оптимизации несущих систем.

Материалы и методы. Описаны методы поиска релевантной литературы в международных реферативных базах. Отбор источников проводился по международным реферативным базам Web of Science издательства Thomson Reuters, Scopus, El Compendex издательства Elsevier, имеющим проработанные инструменты для тематического поиска, а также гарантирующим легитимность и качество представляемых литературных источников.

Результаты. Современные методы поиска оптимальных конструктивных решений классифицированы по ряду признаков, включающих тип метаэвристического подхода, вид оптимизационного критерия, число целей оптимизации, способы учета ограничений, представление варьируемых параметров, учет этапов жизненного цикла, живучести, надежности, уровней безопасности объектов и рисков аварийных ситуаций. Изложен ряд наиболее перспективных методов оптимизации, базирующихся на математической формализации физических процессов, а также комбинированные поисковые стратегии. Рассмотрены некоторые градиентные подходы, методы математического программирования.

Выводы. Определено, что для удовлетворения современных требований к строительным несущим конструкциям, включая критерии безопасности, минимизации затрат в период жизненного цикла, надежности, живучести и других свойств, наибольшее распространение получили методы, имеющие аналогию с биологическими процессами в живой природе. Эти методы обладают возможностью относительно быстрой адаптации к решению широкого класса задач в строительстве. Анализ проведенного обзора показал, что наибольшие перспективы для решения задач оптимизации строительных конструкций имеют стохастические методы, оперирующие дискретными множествами параметров проектирования, что отражает специфику проектирования строительных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы оптимизации, эволюционное моделирование, метаэвристический поиск, математическое программирование, оптимизация живучести, риск, надежность, безопасность, аварийные ситуации, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30

Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev

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

ABSTRACT

Introduction. A review of modern approaches to the search for design solutions, optimal by various criteria, for load-bearing construction structures is given. The paper discloses problems of finding solutions on discrete sets of variable parameters reflecting modern approaches to design considering the available range of materials and products. It also formulated the

goals of the literary review, its relevance to modern socio-economic conditions, and a brief historical digest reflecting the stages of development of search methods. The focus of the review is on new metaheuristic approaches that are used in world practice to optimize the load-bearing systems.

Materials and methods. The methods of searching for relevant literature in international scientific databases are described. The selection of sources was based on the international Web of Science databases by publishing house Thomson Reuters, Scopus, El Compendex by Elsevier publishing house which, had well-developed tools for thematic search as well as guaranteeing the legitimacy and quality of the literature.

Results. The article classified the modern methods of searching for optimal design solutions by several criteria. Those included the metaheuristic approach type, number of optimization goals, methods of considering constraints, presentation of varying parameters, consideration of life cycle stages, survivability, reliability, facility safety levels, and accident risks. A series of the most promising optimization methods based on the mathematical formalization of physical processes, as well as combined iterative strategies, are described. Attention is also paid to some gradient approaches and methods of mathematical programming.

Conclusions. The paper has shown that to meet modern requirements for building load-bearing structures, including safety criteria, minimizing costs during the life cycle, reliability, survivability, and other properties, the methods similar to biological processes in wildlife are most widely spread. These methods have a relatively fast adaptability to solve a broad class of problems in construction. Analysis of the reviewed sources showed that the far-reaching methods for solving problems of construction design optimization are stochastic methods using discrete sets of design parameters that reflect features of building structure design.

KEYWORDS: optimization methods, evolutionary modeling, metaheuristic search, mathematical programming, survivability optimization, risk, reliability, safety, emergencies, life cycle

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):12-30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий и уровня техники в строительной отрасли требует постоянного совершенствования методов оптимизации конструктивных решений для объектов нормального и повышенного уровней ответственности. С появлением высокопроизводительных компьютеров возникли широкие возможности для создания и совершенствования оптимизационных алгоритмов, в которых используются вероятностные подходы к поиску решений. Усложнение объемно-планировочных решений для объектов строительства приводит соответственно к росту сложности оптимизационных задач. В данных задачах, как правило, требуется варьировать несколько десятков параметров с учетом номенклатуры доступных материалов и изделий. В этом случае представить функцию цели в аналитическом виде весьма затруднительно. Для решения задач такого типа наиболее эффективны методы, базирующиеся на случайном поиске и оперирующие некоторыми основами нечеткой логики, например, принципами, основанными на процессах, протекающих в природе, моделирующих поведение некоторых организмов или физических явлений. Такие подходы к оптимизации в литературе получили название метаэвристических. Кроме того, достаточно эф-

фективно используются комбинированные стратегии, которые могут в едином поисковом процессе сочетать разные процедуры поиска или принципы учета ограничений. В существующих социально-экономических условиях особенно актуальным является выбор методики поиска рациональных решений с учетом как минимизации ресурсоемкости, так и безопасности.

Область научных исследований, связанная с современными методами оптимизации, развивается по мере развития вычислительных мощностей компьютеров, еще полвека назад для оптимального проектирования широко использовались методы, основанные на чувствительности целевой функции к изменениям варьируемых параметров. В этих методах условной и безусловной оптимизации целевая функция представлялась в виде аналитического выражения, а ее экстремум находился с помощью частных производных. Такие подходы в целом можно назвать градиентными. Следует отметить, что ряд задач оптимизации строительных конструкций и сейчас решается на их основе. Новым этапом в развитии поисковых методов стало развитие вычислительной техники и методов расчета напряженно-деформированного состояния строительных конструкций. В частности, с развитием метода конечных элементов и технологии многопоточных вычислений появились высокопроизводительные

стохастические алгоритмы, которые не требуют задания функции цели в явном виде.

Актуальные сегодня тенденции оптимизации лежат в области комбинированного применения различных поисковых методик и расширения возможностей оптимизации на основе нескольких критериев оптимальности. Релевантные в настоящее время smart-концепции проектирования требуют учета при оптимизации полного жизненного цикла сооружений или отдельных его этапов. Поэтому для обеспечения современного уровня отечественных научных исследований при разработке методов оптимизации представляется необходимым сделать литературный обзор мировых достижений данной предметной области. Другая цель обзора — описание основных современных подходов к оптимальному поиску решений для строительных конструкций с целью выявления перспектив их применения к решению различного рода оптимизационных задач. Следует отметить, что в отечественной научной литературе этим вопросам уделяется мало внимания.

МЕТОДЫ

Поиск релевантной мировой литературы осуществлялся путем применения следующего подхода. Был составлен глоссарий терминов по предметной области, который сопоставлялся с наиболее часто употребляемыми ключевыми словами в реферативных базах научного цитирования. В результате поиск проводился по этим базовым ключевым словам. Кроме того, в соответствии с возможностями поисковых систем выполнялся поиск по авторам и датам выпуска научных работ. Для отбора литературы использовались реферативные наукометрические базы данных Web of Science, Scopus, EI Compendex, РИНЦ, доступные в сети Интернет и на базе университета. Оценка качества публикаций выполнялась на основе следующих факторов:

- наименование и наукометрические показатели журнала, в частности квартиль цитируемости;
- число цитирований публикации другими исследователями;
- стиль изложения авторами материалов статьи, качество аннотации;
- наличие и число разобранных в статье примеров оптимизации конструкций;
- наличие в статье тестирования алгоритмов на математических функциях и стандартных примерах;
- объем ссылочной литературы, корректность ссылок на источники.

Для формирования библиографического списка использовались системы EndNote Web of Science и Mendeley с модификацией стиля оформления

Vancouver. В результате было отобрано 102 источника литературы, содержащие следующие классификационные признаки: тип конструкции (стальная, железобетонная, деревянная, композитная многослойная); число критериев оптимизации; учет особенностей проектирования строительных конструкций (жизненный цикл, необходимость учета нелинейностей, надежности, безопасности, рисков аварийных ситуаций); тип метода оптимизации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОБЗОРА

Современный процесс проектирования деформируемых систем, в частности строительных несущих конструкций, обычно требует выбора параметров на ограниченных дискретных множествах допустимых значений и выполнения топологической [1–8] оптимизации конструкций. Часто эти два аспекта совмещают в одной итерационной процедуре, в таком случае оптимизация называется структурно-параметрической. Для синтеза топологии конструкций (формообразования) используются следующие основные подходы:

- исключение элементов из некоторой базовой избыточной структуры с ограничениями на вес конструкции [1], действующие напряжения [2], перемещения [4], геометрическую изменяемость [5] и др.;
- алгоритмы, основанные на оценке плотностей и контактных давлений между частицами конструкции, представляемой в виде дискретизированной континуальной структуры [7];
- использование диаграмм Вороного [8] и триангуляции Делоне [9] для плоских конструкций или тетраэдризации для пространственных систем;
- использование индуктивного метода [10, 11], особенностью которого является возможность получения аналитических выражений для усилий, прогибов и других параметров конструкции, что создает широкие возможности как для топологической, так и для параметрической оптимизации. Реализация процедуры топологического синтеза конструкции на примере стандартной консольной фермы показана на рис. 1.

Следует отметить, что алгоритмы синтеза топологии составляют лишь малую часть от общего числа оптимизационных методов. Большую часть составляют методы однокритериальной параметрической оптимизации. Для относительно простых конструкций могут использоваться методы математического программирования, например, указанные в работах [12–16]. В частности, описываются приближенные решения задачи о коммивояжере [12], методы двухуровневого энергетического поиска [14], упрощенного интегрирования целевых функций методом ячеек [16].

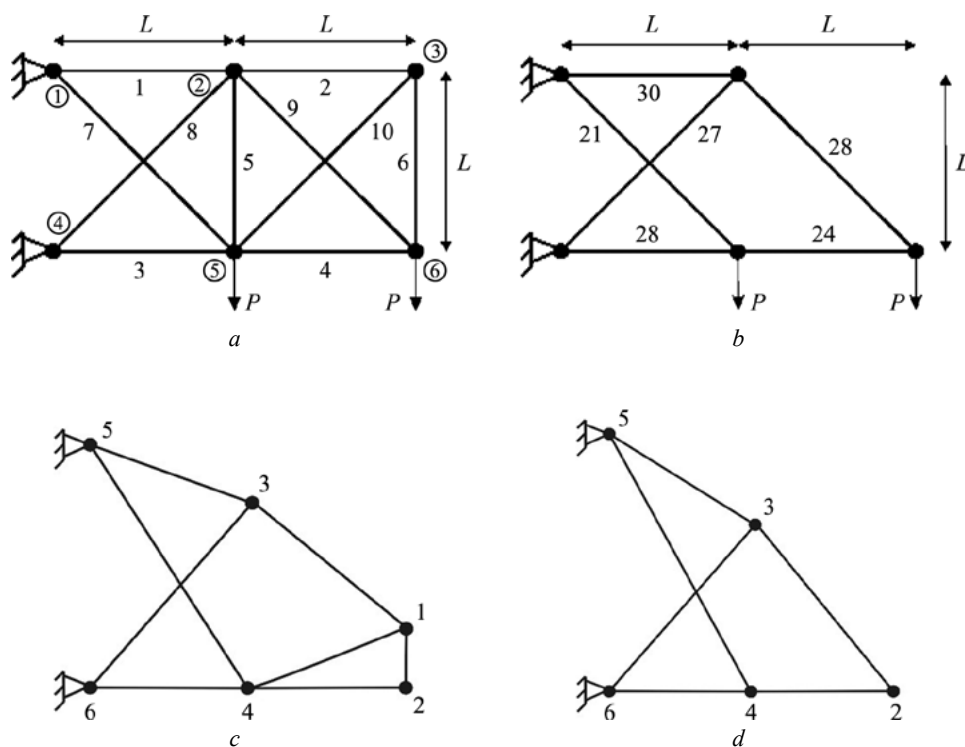


Рис. 1. Топологический синтез конструкции: исходная система (a); результаты оптимизации при фиксированном положении узлов (b) и при изменении координат узлов (c, d)

Fig. 1. Topological synthesis of the design: the initial system (a); optimization results for a fixed position of nodes (b) and changed coordinates of nodes (c, d)

Рассмотрим основные общие методы поиска конструктивных решений. Эти методы содержат элемент случайности и позволяют решать широкий класс современных задач оптимизации строительных конструкций. Известен ряд подходов к оптимизации, таких как методы роя частиц [17–19], отжига [20, 21], светлячков [22, 23], муравьиной колонии [24, 25], теплопередачи [26], взрыва [27], поиска гармонии [28], генетические алгоритмы [29–31], нейронные сети [32–34] и т.п. Ряд из них имеет существенные ограничения для применения к задачам оптимизации строительных конструкций, поэтому в опубликованных научных работах рассматриваются лишь элементарные примеры. В методах роя частиц происходит движение к оптимальным решениям поисковых агентов-частиц, обменивающихся в процессе движения информацией с соседями по рюю. При этом каждая частица сохраняет информацию о лучшем из найденных ею решений и при нахождении на очередном цикле лучшего решения происходит обновление значений для каждой частицы и роя частиц в целом. Информация, которой обмениваются частицы, — это значение целевой функции и варьируемых параметров, а также в ряде случаев информация о степени выполнения поставленных ограничений (запасы прочности, жесткости) и т.п. Методы отжига ба-

зируются на принципе введения иных поисковых агентов. Это атомы, выстроенные в кристаллическую решетку, в которой с некоторой вероятностью допускаются перемещения атомов между ячейками. В качестве цели оптимизации предполагается минимизация температуры рассматриваемой виртуальной системы. В случае, если в кристаллической решетке переход приведет атом в состояние с меньшей энергией происходит падение температуры всей системы, т.е. движение к более оптимальному решению. Метод светлячков основан на использовании в качестве поисковых агентов — частиц, обладающих виртуальным параметром «яркости», т.е. так называемых светлячков. На каждой итерации поискового алгоритма светлячки сортируются по «яркости», определяющей близость к оптимальному решению, и происходит перемещение менее ярких светлячков к более ярким. При этом яркость зависит от расстояния между агентами и, если для светлячка нет никого более яркого, то он перемещается случайным образом. Алгоритмы теплопередачи, взрыва и поиска гармонии основаны на аналогичных физических явлениях. Отдельная большая область оптимизации конструктивных систем связана с генетическими алгоритмами, использующими основные принципы теории эволюции видов Ч. Дарвина. Использование алгоритмов,

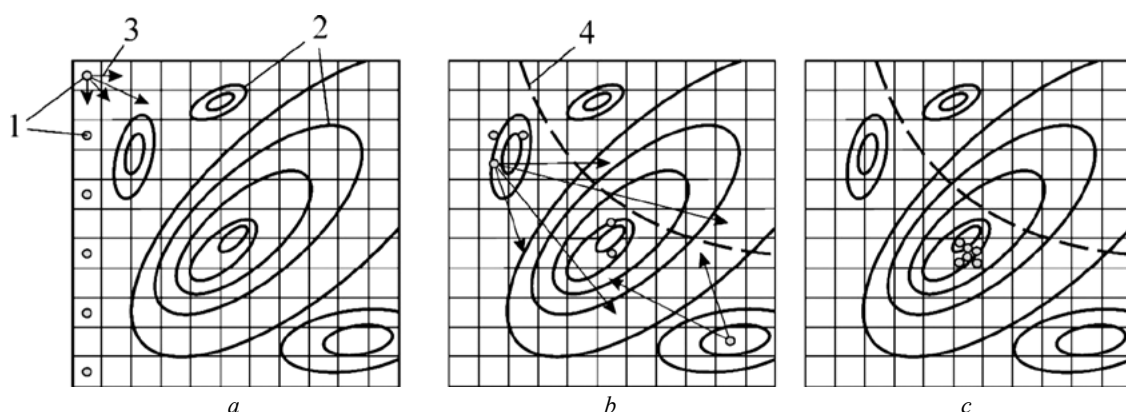


Рис. 2. Иллюстрация этапов поиска экстремума на примере шести частиц: *a* — генерация вариантов конструкции (частиц); *b* — идентификация области допустимых решений. Выбор направления движения и скорости частиц; *c* — движение частиц с преодолением локальных оптимумов; 1 — генерированные частицы; 2 — изополя значений функции цели; 3 — направления движения частиц; 4 — граница, отделяющая область допустимых решений (снизу) от области недопустимых решений

Fig. 2. Illustration of extremum seeking stages by the example of six particles: *a* — generation of design variants (particles); *b* — identification of the region of feasibility. Choice of the direction of motion and particle velocity; *c* — particle motion with overcoming local optimums; 1 — generated particles; 2 — distribution of goal function values; 3 — directions of particle motion; 4 boundary curve separating the region of feasibility (bottom edge) from the region of infeasibility

основанных на применении нейронных сетей позволяет реализовывать поиск оптимума с самообучением. Используя нейронные сети, возможно выполнять имитационное моделирование, в ходе которого будет с той или иной степенью точности определяться значение функции цели, а затем можно реализовывать различные методы оптимизации, в том числе генетические алгоритмы, методы роя и др. Основные этапы оптимизации на основе аналогии роя частиц представлены на рис. 2.

Каждый из общих методов оптимизации адаптируется к поиску решений исходя из следующих признаков: материал, из которого изготавливается конструкция; тип конструктивной системы; жизненный цикл; учет особенностей эксплуатации; возможность аварийных ситуаций и связанные с этим надежность и риски. Первоначально рассмотрим работы по оптимизации конструкций различных типов. Оптимизируются композитные сталебетонные [33] и деревянно-бетонные конструкции [15], тонкостенные взрывозащитные панели [35], многослойные пластинчатые системы из двух материалов [37], а также слоистые стержни из различных материалов [38]. Для оптимизации композитных систем наиболее часто применяются генетические алгоритмы [36] и методы роя частиц [30, 39, 40]. При этом решаются как одноцелевые, так и многоцелевые задачи [39] при варьировании геометрии слоев [36] и нагелей, их соединяющих [40].

Для стальных конструкций решаются следующие основные задачи: оптимизация конструктивных решений для сейсмостойких конструкций рам с учетом типа узлов соединений [41], наличия в составе

рамы пластины, работающей на знакопеременную сдвиговую нагрузку [43]. Минимизируется вес слоистых металлоконструкций [45], а также плоских и пространственных ферменных конструкций [46, 47]. Оптимальное проектирование стальных конструкций выполняется также с учетом жизненного цикла сооружения [49], контроля общей устойчивости [50] и возможности прогрессирующего разрушения [48]. Для решения этих задач используются преимущественно методы Монте-Карло [42], роя частиц и генетические алгоритмы [44, 46].

Оптимизация железобетонных конструкций выполняется с учетом их сейсмостойкости [51, 62], безопасности и надежности с учетом риска проектных воздействий [52, 60, 64]. Минимизация веса этих конструкций достигается с помощью выбора рациональных схем армирования [52, 58, 59]. Отдельным направлением является поиск рациональных решений для железобетонных балок и колонн заводского изготовления с учетом влияния производственных факторов, например, расходуемой на изготовление тепловой энергии [54], факторов внешней среды, вызывающих коррозионные повреждения [57], а также выбросов в атмосферу углекислого газа [63]. Рассмотрен выбор рациональной стоимости восстановительных мероприятий при реконструкции и ремонте железобетонных систем [55], а также их многовариантном нагружении [61]. Предложен метод оптимизации железобетонных систем с учетом частичного прогрессирующего разрушения [56]. Основные методы решения этих задач — генетические алгоритмы и модификации алгоритмов роя частиц [57]. Пример реали-

зации генетического алгоритма (SGA) для поиска рационального конструктивного решения показан на рис. 3.

Значительно меньше исследований посвящено деревянным конструкциям. Прежде всего внимание уделяется минимизации стоимости многослойных деревянных панелей и оболочек [65, 67] с учетом проектирования, изготовления и эксплуатации. Выполняется поиск оптимальных по критерию стоимости и огнестойкости защитных покрытий на основе древесины [66]. Затрагиваются вопросы оптимального проектирования деревянных ферм с учетом податливости их узлов [70], а также восстановления и повышения надежности поврежденных деревянных балок [68]. Разработаны методики оптимального проектирования деревянных конструкций,

учитывающие оценки их технического состояния в период жизненного цикла [64, 69].

Важным вопросом при оптимальном проектировании строительных конструкций является учет их надежности. Наиболее распространены в поисковых алгоритмах вероятностные модели надежности, а методы, их использующие, получили название RBDO (Reliability-based design optimization — оптимизация на основе анализа надежности). При этом в процессе поиска преимущественно учитываются отказы конструкций, связанные с разбросом механических характеристик материалов и дисперсией нагрузок. Так, в трудах [71, 72, 74, 75] такие алгоритмы оптимизации разработаны для железобетонных рамных и плитных конструкций. В работе [71] проектная надежность системы рассматривается как

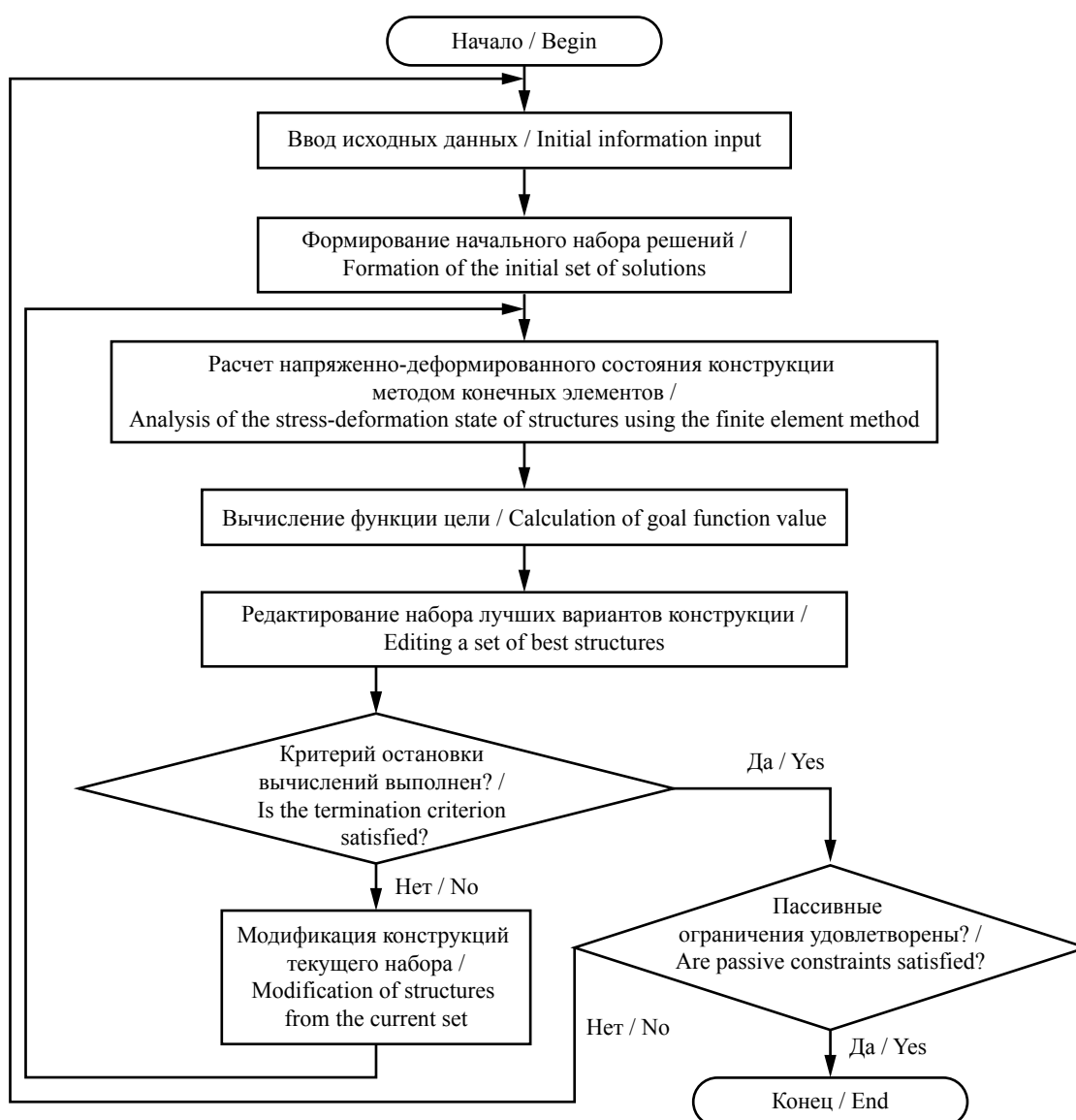


Рис. 3. Реализация генетического алгоритма оптимизации для несущей конструкции

Fig. 3. Implementation of genetic algorithm for load-bearing structure optimization

признак отнесения ее к определенному уровню безопасности, в статье [72] исследуется поиск решений при одновременном действии на плиты сосредоточенных сил и температурных воздействий. В работе [74] для железобетонных конструкций в процессе оптимизации учитывается взаимодействие с грунтовым основанием. Разработаны также поисковые схемы и для стальных стержневых конструкций [73, 76, 77]. При этом особое внимание уделяется мостовым сооружениям [76, 77], для которых кроме минимизации стоимости «в деле» на основе вероятностной модели надежности рассматривается и минимизация так называемой стоимости разрушений при наступлении отказа, оценка срока службы конструкции и устанавливается «коэффициент важности сооружения», определяющий по существу его уровень ответственности

С вопросами надежности в оптимальном проектировании связан и учет рисков аварийных ситуаций [83, 78]. Для различных типов конструкции разработаны схемы поиска оптимальных решений с учетом как материальных [79, 80], так и социальных [82] потерь. Основными потенциальными угрозами аварийной ситуации в работах, связанных с оценкой риска, являются коррозионные повреждения [81], а также природные и антропогенные внешние воздействия, приводящие к выключению из работы конструкций одной или нескольких опор [80]. В качестве основных поисковых инструментов в работах, связанных с оценкой безопасности и рисков, используются генетические алгоритмы [78, 80], метод Монте-Карло [79] и другие метаэвристические методы.

Стремительно развивающимся трендом в теории оптимизации несущих систем, в частности в области строительства, является учет жизненного цикла в процессе поиска [84]. При этом в качестве этапов жизненного цикла часто рассматриваются строительство, эксплуатация, реконструкция и утилизация сооружения. На основе такого подхода к оптимизации решен ряд важных задач. В публикации [85] для сооружений пассивного ветряного охлаждения минимизируется стоимость жизненного цикла, для железобетонных конструкций рассматриваются случаи оптимизации конструктивных решений с учетом сейсмического воздействия [87], превентивного предотвращения образования коррозионных повреждений [88] и действия агрессивных сред [86] на этапе эксплуатации. С учетом жизненного цикла и привязки к географическому положению оптимизировались стеновые конструкции [89], при этом на этапе эксплуатации кроме прочностных и деформационных критериев рассматривались вопросы теплопереноса и паропроницаемости этих ограждающих конструкций.

Другая современная тенденция в оптимизации — мультикритериальная оптимизация. В этих методах поиск решения осуществляется по нескольким целям. В качестве общего критерия оптимальности в этих работах чаще всего используются известные принципы В. Парето и Д. Неша [90]. Часто на основе многокритериальной оптимизации решаются междисциплинарные задачи, в которых к несущей конструкции предъявляются требования из нескольких смежных дисциплин, например, из архитектуры, теплотехники, акустики и т.п. При-

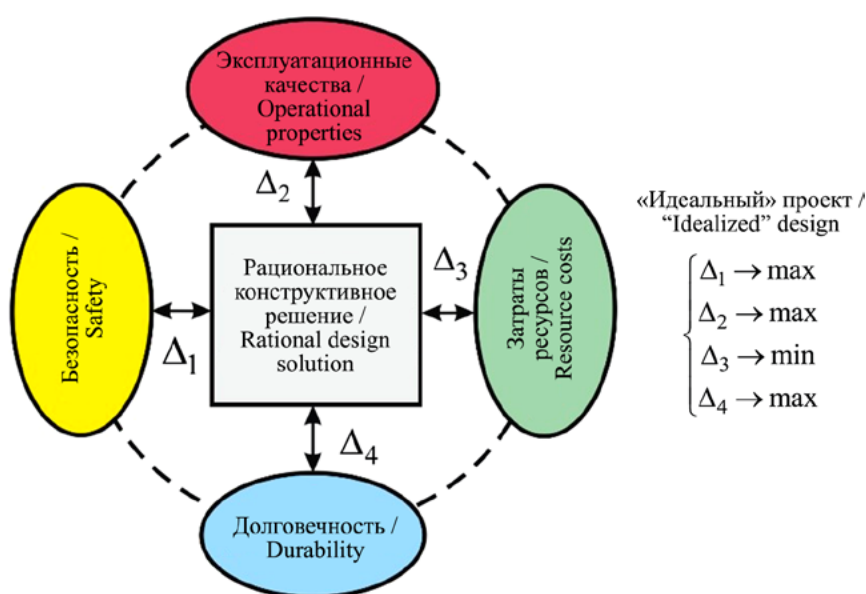


Рис. 4. Вариант представления многокритериального подхода к оптимизации

Fig. 4. A variant of a multi-criteria optimization approach presentation

менительно к строительной конструкции многокритериальный подход может быть изображен на рис. 4.

На основе нескольких критериев оптимальности выполнялся поиск конструктивных решений высотных зданий с гасителями сейсмических колебаний [91], разработаны подходы к оптимизации износостойкости для стальных трубчатых конструкций [92], минимизации веса многослойных пластин [93], проектирования взрывозащитных панелей зданий [94]. Работа [95] решает мультидисциплинарную задачу оптимизации сферических оболочек, которые служат покрытиями над спортивными сооружениями. В качестве критериев оптимальности здесь выделяются три группы: энергосбережение, светопропускание, прочностные и деформационные характеристики. Во многих многокритериальных задачах инструментом поиска решений являются генетические алгоритмы и алгоритмы роя частиц, в том числе используемые совместно с системами машинного обучения [96, 98].

Одна из современных проблем, связанных с развитием метаэвристических оптимизационных алгоритмов, — повышение их сходимости при варьировании большим числом параметров. По существу, в настоящее время обеспечить гарантированную сходимость таких алгоритмов к одному решению, являющемуся глобальным оптимумом, не представляется возможным. Однако продвигаться в этом направлении позволяют подходы, основанные на имитационном моделировании и введении в итерационный процесс мягких штрафных функций. Так, например, в работе [68] для повышения сходимости генетического алгоритма поиска параметров системы усиления балки для каждого ее варианта вычисляется величина функции цели, которая умножается на коэффициент штрафа « P »:

$$P = \begin{pmatrix} 1 + \chi \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) k_{\sigma} + \\ + \chi \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) k_N + \\ + \chi \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) k_{\delta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k_{σ} , k_N , k_{δ} — задаваемые коэффициенты, учитывающие долю значимости штрафа при нарушении соответствующего ограничения; σ , N_{cr} , δ — максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в элементе протеза, максимальная критическая сила для элемента протеза, перемещение восстановленной системы соответственно; $[\sigma]$, $[N_{cr}]$, $[\delta]$ — допускаемые значения этих величин; $\chi(x)$ — функция Хевисайда от вещественного аргумента x $\chi(x) = 0$, если $x < 0$; $\chi(x) = 1$, если $x \geq 0$. Имитационная мо-

дель (ИМ) (2) может представлять собой простейшую экспертную систему, позволяющую выполнять оценки удовлетворения ограничений для промежуточных вариантов конструкций без применения развернутой процедуры анализа по методу конечных элементов. Система уравнений этой экспертной системы может быть сформирована на базе реплики полного факторного численного эксперимента в следующем виде:

$$\text{ИМ} = \left\langle \{x_i, x'_j, y, h(x_i, y), P\} \mid i \in N, j \in K \right\rangle, \quad (2)$$

где x_i — набор входных переменных моделируемого объекта; x'_j — набор выходных параметров; y — функция с аргументами x_i , позволяющая вычислить x'_j ; $h(x_i, y)$ — множество ограничений величин x_i и y ; P — решатель, осуществляющий использование имитационной модели; N, K — множества натуральных чисел.

При формировании решателя, например, для априорных оценок напряжений может вводиться схема дробного факторного эксперимента, где для каждого нагружения конструкции уравнения регрессии представляется в виде

$$t_{mj} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \tilde{x}_i, \quad (j = 1, \dots, j_1);$$

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i, \quad \bar{x}_i = (x_{i,\min} + x_{i,\max})/2, \quad (3)$$

где t_{mj} — значение величины напряжения для точки сечения конструктивного элемента или для конструкции; a_0 , b_0 — свободные коэффициенты; a_i , $(i = 1, 2, \dots, n)$ — основные коэффициенты уравнения регрессии; n — число параметров; j_1 — число уравнений для определения t_{mj} ; $m = 1, 2, \dots, m_0$ — номер нагружения; m_0 — число нагружений; x_i — величина i -го изменяемого параметра; $x_{i,\min}$, $x_{i,\max}$ — минимальное и максимальное допускаемые значения для этого параметра. Формулы для нахождения t_{mj} определяются положениями теории сопротивления материалов.

Анализ литературы позволил выявить ряд конкурентных преимуществ рассмотренных подходов к поиску рациональных решений по сравнению с градиентными методами, а также с алгоритмами, реализующими «чисто» случайный поиск. Прежде всего, это возможность учета в едином итерационном процессе всех необходимых этапов жизненного цикла сооружения. Реализовать, например, расчет стоимости жизненного цикла можно, используя принцип организации многопоточных вычислений. В каждом потоке рассматривается один этап жизненного цикла и соответствующие ему затраты, при этом связь между этапами может осуществляться системой аналитических выражений или стохастических зависимостей [83, 91]. Применительно

к генетическим алгоритмам учет жизненного цикла можно организовать с помощью изолированных параллельно эволюционирующих наборов проектных решений. Другим преимуществом по сравнению с градиентными подходами является ориентированность на номенклатуру производителя. Данный принцип состоит в том, что дискретные множества параметров формируются исходя из конкретных характеристик сортов производимых изделий, что позволяет получать готовые конструктивные решения. При этом конструктивные требования могут быть учтены расширенными инструментами группировки параметров, включая и условия симметрии, и сохранение габаритных размеров, и обеспечение требуемых зазоров, и т.п. [52, 73]. Традиционное проектирование и оптимизация не имеют таких возможностей. Еще одним значимым преимуществом является автоматизированное формирование структуры конструкций. Как правило, структуру конструкции на начальном этапе формирует проектировщик, а затем выполняется оптимизация параметров. Такой подход может существенно сузить выбор рациональной топологии конструкции, особенно в случае сложных систем. Использование в процессе поиска описанных выше алгоритмов избыточных структур [29], разбиения плоскости или пространства на примитивы [97] позволяет получать несколько вариантов топологии, из которых можно выбрать наиболее соответствующий поставленной задаче.

Завершая основную часть обзора, следует отметить совокупность методов оптимизации, предметом исследования которых не являются проектные параметры несущих конструкций, определяющие прочность, жесткость, геометрию сечения или ее топологию. Это методы оптимального проектирования организационно-технологических решений при строительстве объектов [99]. Выбор их рациональных параметров может значительно сказаться на итоговой стоимости жизненного цикла как конструкции, так и здания в целом. Очень важной в этом смысле является идея работы [100], где на основе поиска решений по известным критериям теории принятия решений в условиях неопределенности А. Вальда и Л. Сэвиджа с применением метода А. Гурвица для оценки устойчивости системы в условиях неопределенности выбираются тип и конструкция слоистых наружных стен. В итоге получается рациональное с позиции энергосбережения, распределения времени и ресурсов на производство работ решение. Известны также и однокритериальные подходы к решению задач оценки времени строительства с учетом случайных факторов и рационального распределения ресурсов на основе генетических алгоритмов [101, 102].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на проведенном обзоре литературы можно сформулировать следующие результаты:

- для решения современных задач оптимизации несущих строительных конструкций получают широкое распространение метаэвристические методы поиска, основанные на математической формализации природных явлений;
- с усложнением конструктивных решений и эксплуатационных требований для строительных несущих систем получают развитие методы многокритериальной оптимизации, учитывающие как особенности проектирования объектов, так и воздействия в период их жизненного цикла, включая ситуации, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации;
- наиболее перспективным методом поиска оптимальных решений как для однокритериальных, так и для многокритериальных схем, по нашему мнению, являются генетические алгоритмы и их модификации.

В качестве обсуждения можно заметить, что в настоящем обзоре уделено внимание далеко не всем метаэвристическим и градиентным подходам к оптимизации, однако оставшиеся за рамками данной работы методы, в той или иной степени имеют сходство с описанными выше методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задач оптимизации в современных социально-экономических условиях, формирующих требования к объектам проектирования, в частности к несущим конструкциям, представляется особенно актуальным. С внедрением информационного моделирования и smart-концепций практически во все области строительства необходимость в проектировании рациональных несущих конструкций требует применения самых современных и высокопроизводительных методов оптимизации. Это обуславливает систематическую необходимость литературного обзора в данной области.

Проведенный обзор продемонстрировал, что современный уровень развития алгоритмов оптимизации для строительных конструкций дает возможность находить рациональные конструктивные решения для широкого класса задач, в число которых входит как синтез топологии, так и поиск параметров проектирования, представленных в виде дискретных множеств. При этом большую эффективность показывают вероятностные метаэвристические методики, основанные на эволюционном моделировании и на алгоритмах роя частиц. Развитие информационных технологий, в том числе много-

поточных параллельных вычислений, облачных вычислений к настоящему времени позволило решать многокритериальные поисковые задачи с несколькими десятками независимо варьируемых параметров.

Перспективное совершенствование этих алгоритмов для практики строительного проектирования позволит получать новые эффективные проектные решения с обеспечением ряда требований, продиктованных современными социально-

экономическими условиями. Развитие алгоритмов поискового процесса в рассмотренных подходах к оптимизации несущих конструкций даст возможность более точно решать задачи переборного типа большой размерности как для строительства, так и для других областей техники, что является одной из актуальных и значимых в последнее десятилетие научных проблем, требующих решения и с позиции науки, и практики проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cao H., Qian X., Chen Z., Zhu H. Enhanced particle swarm optimization for size and shape optimization of truss structures // *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1939–1956. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1273912
2. Jain N., Saxena R. Effect of self-weight on topological optimization of static loading structures // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57. Issue 2. Pp. 527–535. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.006
3. Yang D., Liu H., Zhang W., Li S. Stress-constrained topology optimization based on maximum stress measures // *Computers and Structures*. 2018. Vol. 198. Pp. 23–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.008
4. Huang X., Xie Y.M. Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. DOI: 10.1002/9780470689486
5. Lynn N., Ali M.Z., Suganthan P.N. Population topologies for particle swarm optimization and differential evolution // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018. Vol. 39. Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.sw-evo.2017.11.002
6. Rahami H., Kaveh A., Gholipour Y. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 9. Pp. 2360–2369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.012
7. Niu C., Zhang W., Gao T. Topology optimization of continuum structures for the uniformity of contact pressures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. Issue 1. Pp. 185–210. DOI: 10.1007/s00158-019-02208-8
8. Podestá J.M., Méndez C.G., Toro S., Huespe A.E., Oliver J. Material design of elastic structures using Voronoi cells // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018. Vol. 115. Issue 3. Pp. 269–292. DOI: 10.1002/nme.5804
9. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 5 (40). С. 28–37. DOI: 10.5862/MCE.40.3
10. Kirsanov M.N. The deflection of spatial coatings with periodic structure // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 58–66. DOI: 10.18720/MCE.76.6
11. Кирсанов М.Н. Анализ прогиба фермы пространственного покрытия с крестообразной решеткой // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 4 (64). С. 52–58. DOI: 10.5862/MCE.64.5
12. Komzsik L. Mathematical optimization // *Approximation Techniques for Engineers*. 2018. Pp. 331–354. DOI: 10.1201/9781315205007-14
13. Gandomi A.H., Yang X.S., Talatahari S., Alavi A.H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization // *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 2013. Pp. 1–24. DOI: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2
14. Aliawdin P., Urbańska K. Limit analysis of geometrically hardening rod systems using bilevel programming // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 89–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.014
15. Schröter H., Simon A., Timmler H.G., Rautenstrauch K., Raue E. Zur berechnung von holz-betonverbundträgern mit methoden der mathematischen optimierung // *Bautechnik*. 2010. Vol. 87. Issue 8. Pp. 474–481. DOI: 10.1002/bate.201010034
16. Sun J.Q., Xiong F.R., Schütze O., Hernández C. Cell mapping methods: Algorithmic approaches and applications. 2018. 226 p. DOI: 10.1007/978-981-13-0457-6
17. Lalwani S., Sharma H., Satapathy S.C., Deep K., Bansal J.C. A survey on parallel particle swarm optimization algorithms // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. Issue 4. Pp. 2899–2923. DOI: 10.1007/s13369-018-03713-6
18. Perez R.E., Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization // *Computers and Structures*. 2007. Vol. 85. Issue 19–20. Pp. 1579–1588. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.10.013
19. Alekseytsev A.V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 7 (83). С. 175–185. DOI: 10.18720/MCE.83.16
20. Akbulut M., Sonmez F.O. Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing // *Computers and Structures*. 2011.

Vol. 89. Issue 17–18. Pp. 1712–1724. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.04.007

21. *Paya-Zaforteza I., Yepes V., Hospitaler A., González-Vidosa F.* CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing // *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Issue 7. Pp. 1501–1508. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.034

22. *Wahid F., Alsaedi A.K.Z., Ghazali R.* Using improved firefly algorithm based on genetic algorithm crossover operator for solving optimization problems // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019. Vol. 36. Issue 2. Pp. 1547–1562. DOI: 10.3233/JIFS-181936

23. *Durbhaka G.K., Selvaraj B., Nayyar A.* Firefly swarm: metaheuristic swarm intelligence technique for mathematical optimization // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Pp. 457–466. DOI: 10.1007/978-981-13-1274-8_34

24. *Manju M., Kant C.* Ant colony optimization: a swarm intelligence based technique // *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol. 73. Issue 10. Pp. 30–33. DOI: 10.5120/12779-9387

25. *Kaveh A., Farahmand Azar B., Hadidi A., Rezazadeh Sorooshi F., Talatahari S.* Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization // *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Vol. 66. Issue 4. Pp. 566–574. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.11.006

26. *Degertekin S.O., Lamberti L., Hayalioglu M.S.* Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017. Vol. 14. Issue 3. Pp. 373–397. DOI: 10.1590/1679-78253297

27. *Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H., Hamdi M.* Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables // *Computers and Structures*. 2012. Vol. 102–103. Pp. 49–63. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013

28. *Mashayekhi M., Salajegheh E., Dehghani M.* Topology optimization of double and triple layer grid structures using a modified gravitational harmony search algorithm with efficient member grouping strategy // *Computers and Structures*. 2016. Vol. 172. Pp. 40–58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.008

29. *Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y.* Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017. Vol. 61. Issue 3. Pp. 471–482. DOI: 10.3311/PPci.8125

30. *Alekseytsev A.V., Akhremenko S.A.* Evolutionary optimization of prestressed steel frames // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 5 (81). С. 32–42. DOI: 10.18720/MCE.81.4

31. *Abdi M., Ashcroft I., Wildman R.* Topology optimization of geometrically nonlinear structures using an evolutionary optimization method // *Engineering*

Optimization. 2018. Vol. 50. Issue 11. Pp. 1850–1870. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1418864

32. *Abouhamze M., Shakeri M.* Multi-objective stacking sequence optimization of laminated cylindrical panels using a genetic algorithm and neural networks // *Composite Structures*. 2007. Vol. 81. Issue 2. Pp. 253–263. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.08.015

33. *Cardozo S.D., Gomes H.M., Awruch A.M.* Optimization of laminated composite plates and shells using genetic algorithms, neural networks and finite elements // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 8. Issue 4. Pp. 413–427. DOI: 10.1590/S1679-78252011000400003

34. *Shirakawa S., Iwata Y., Akimoto Y.* Dynamic optimization of neural network structures using probabilistic modeling // *32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018*. 2018.

35. *Yang C., Xu P., Yao S., Xie S., Li Q., Peng Y.* Optimization of honeycomb strength assignment for a composite energy-absorbing structure // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 127. Pp. 741–755. DOI: 10.1016/j.tws.2018.03.014

36. *Muc A., Gurba W.* Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures // *Composite Structures*. 2001. Vol. 54. Issue 2–3. Pp. 275–281. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00098-8

37. *Coelho P.G., Guedes J.M., Rodrigues H.C.* Multiscale topology optimization of bi-material laminated composite structures // *Composite Structures*. 2015. Vol. 132. Pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.059

38. *Blasques J.P., Stolpe M.* Multi-material topology optimization of laminated composite beam cross sections // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. Issue 11. Pp. 3278–3289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.002

39. *Suresh S., Sujit P.B., Rao A.K.* Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design // *Composite Structures*. 2007. Vol. 81. Issue 4. Pp. 598–605. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.10.008

40. *Lin J.P., Wang G., Xu R.* Particle swarm optimization-based finite-element analyses and designs of shear connector distributions for partial-interaction composite beams // *Journal of Bridge Engineering*. 2019. Vol. 24. Issue 4. P. 04019017. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371

41. *Kaveh A., Ghafari M.H., Gholipour Y.* Optimum seismic design of steel frames considering the connection types // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 130. Pp. 79–87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.002

42. *Myasnichenko V., Sdobnyakov N., Kirilov L., Mikhov R., Fidanova S.* Monte Carlo approach for modeling and optimization of one-dimensional bimetallic nanostructures // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intel-*

- ligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2019. Pp. 133–141. DOI: 10.1007/978-3-030-10692-8_15
43. Guo Z., Zhu F., Wang Y., Chang H. Optimization analysis on steel frame with short-limb steel plate composite shear wall // *Progress in Steel Building Structures*. 2017. Vol. 19. Issue 4. Pp. 36–42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.04.005
44. Cazacu R., Grama L. Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA // *Procedia Technology*. 2014. Vol. 12. Pp. 339–346. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.496
45. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Duong-Gia D., Nguyen-Thoi T. An efficient procedure for lightweight optimal design of composite laminated beams // *Steel and Composite Structures*. 2018. Vol. 27. Issue 3. Pp. 297–310. DOI: 10.12989/scs.2018.27.3.297
46. Erbaturo F., Hasançebi O., Tütüncü İ., Kılıç H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms // *Computers and Structures*. 2000. Vol. 75. Issue 2. Pp. 209–224. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00084-X
47. Chen M., Zhao Y., Xie Y. Topology optimization and additive manufacturing of nodes in spatial structures // *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 52. Issue 2. Pp. 1–10.
48. Hassanzadeh A., Gholizadeh S. Collapse-performance-aided design optimization of steel concentrically braced frames // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 197. P. 109411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109411
49. Sarma K.C., Adeli H. Life-cycle cost optimization of steel structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002. Vol. 55. Issue 12. Pp. 1451–1462. DOI: 10.1002/nme.549
50. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y., Kurchenko N.S. Flat rod systems: Optimization with overall stability control // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 181–192. DOI: 10.18720/MCE.76.16
51. Zhang C., Tian Y. Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 185. Pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.108
52. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 04005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199704005
53. Amir O. A topology optimization procedure for reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2013. Vol. 114–115. Pp. 46–58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.011
54. Yeo D., Gabbai R.D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 8. Pp. 2028–2033. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.04.014
55. Lee C.K., Kim S.K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks // *Automation in Construction*. 2007. Vol. 16. Issue 2. Pp. 153–164. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.03.001
56. Tamrazyan A.G., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00163. DOI: 10.1051/mateconf/201711700163
57. Esfandiari M.J., Urgessa G.S., Sheikholesarefin S., Manshadi S.H.D. Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMP SO algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 115. Pp. 149–160. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.09.007
58. Kulkarni A.R., Bhusare V. Structural optimization of reinforced concrete structures // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2016. Vol. V5. Issue 07. DOI: 10.17577/ijertv5is070156
59. Тамразян А.Г., Долганов А.И., Калеев Д.И., Жихарев Ф.К., Звонов Ю.Н., Зубарева С.Э., Убыш А. К вероятностной оценке надежности железобетонных многопустотных панелей перекрытий // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 4 (370). С. 267–271.
60. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов — необходимое условие безопасности зданий и сооружений // *Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений»*. 2009. № 1. С. 160–171.
61. Bruggi M. A numerical method to generate optimal load paths in plain and reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2016. Vol. 170. Pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.03.012
62. Kaveh A., Zakian P. Optimal seismic design of reinforced concrete shear wall-frame structures // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 18. Issue 7. Pp. 2181–2190. DOI: 10.1007/s12205-014-0640-x
63. Yeo D., Potra F.A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization // *Journal of Structural Engineering (United States)*. 2015. Vol. 141. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000888
64. Булгаков С.Н., Тамразян А.Г., Рахман И.А., Степанов А.Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / под общ. ред. Тамразяна А.Г. М.: Изд-во АСВ, 2012. 297 с.
65. Mayencourt P., Mueller C. Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way bending // *Structures*. 2019. Vol. 18. Pp. 48–59. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.12.009

66. Yamaguchi T., Hasemi Y., Kamikawa D., Suzuki J.I. Optimization of the wood-based fire protection layer — An engineering approach to the design of fire-resistant building elements based on a sacrifice-layer concept // WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering. 2018.

67. Chahade T., Schober K.U., Morillas L. Structural design optimization of multidimensional gridshells: Parametric interaction of architecture, engineering and manufacturing // WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering. 2018.

68. Alekseytsev A., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost minimization for safety enhancing of timber beam structures in historical buildings // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03002. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703002

69. Loebjinski M., Köhler J., Rug W., Pasternak H. Development of an optimization-based and practice-orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures // Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision — Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018. 2019.

70. Šilih S., Premrov M., Kravanja S. Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility // Engineering Structures. 2005. Vol. 27. Issue 1. Pp. 145–154. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.10.001

71. Aoues Y., Chateaufort A. Reliability-based optimization of structural systems by adaptive target safety — Application to RC frames // Structural Safety. 2008. Vol. 30. Issue 2. Pp. 144–161. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.10.002

72. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 715–720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

73. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of steel frame building systems in terms of parameters and reliability requirements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052003

74. Khatibinia M., Salajegheh E., Salajegheh J., Fadaee M.J. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel // Engineering Optimization. 2013. Vol. 45. Issue 10. Pp. 1147–1165. DOI: 10.1080/0305215X.2012.725051

75. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 467. Pp. 404–409. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.404

76. García-Segura T., Yepes V., Frangopol D.M., Yang D.Y. Lifetime reliability-based optimization of

post-tensioned box-girder bridges // Engineering Structures. 2017. Vol. 145. Pp. 381–391. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.013

77. Ghasemi S.H., Nowak A.S. Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state // Engineering Structures. 2017. Vol. 152. Pp. 226–237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.012

78. Li G., Hu H. Risk design optimization using many-objective evolutionary algorithm with application to performance-based wind engineering of tall buildings // Structural Safety. 2014. Vol. 48. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.01.002

79. Beck A.T., Verzenhassi C.C. Risk optimization of a steel frame communications tower subject to tornado winds // Latin American Journal of Solids and Structures. 2008. Vol. 5. Issue 3. Pp. 187–203.

80. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199704005

81. Li C.Q., Ian Mackie R., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Vol. 22. Issue 5. Pp. 335–346. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x

82. Gardoni P. Risk and reliability analysis // Springer Series in Reliability Engineering. 2017. Pp. 3–24. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_1

83. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost // Structural Safety. 2014. Vol. 48. Pp. 40–50. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.02.002

84. Schneiderova-Heralova R. Importance of life cycle costing for construction projects // Engineering for Rural Development. 2018. Pp. 1223–1227. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N405

85. Lagaros N.D., Karlaftis M.G. Life-cycle cost structural design optimization of steel wind towers // Computers and Structures. 2016. Vol. 174. Pp. 122–132. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.09.013

86. Navarro I.J., Yepes V., Martí J.V. Life cycle cost assessment of preventive strategies applied to prestressed concrete bridges exposed to chlorides // Sustainability (Switzerland). 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 845. DOI: 10.3390/su10030845

87. Vitiello U., Asprone D., Di Ludovico M., Prota A. Life-cycle cost optimization of the seismic retrofit of existing RC structures // Bulletin of Earthquake Engineering. 2017. Vol. 15. Issue 5. Pp. 2245–2271. DOI: 10.1007/s10518-016-0046-x

88. Nie J., Tao M., Huang Y., Tian S., Chen G. Research advances of steel-concrete composite structural systems // Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures. 2010. Vol. 31. Issue 6. Pp. 71–80.

89. Ramin H., Hanafizadeh P., Ehterami T., AkhavanBehabadi M.A. Life cycle-based multi-objective optimization of wall structures in climate of Tehran // *Advances in Building Energy Research*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 18–31. DOI: 10.1080/17512549.2017.1344137
90. Greiner D., Periaux J., Emperador J.M., Galván B., Winter G. Game theory based evolutionary algorithms: a review with nash applications in structural engineering optimization problems // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Vol. 24. Issue 4. Pp. 703–750. DOI: 10.1007/s11831-016-9187-y
91. Pourzeynali S., Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms // *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 311. Issue 3–5. Pp. 1141–1160. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.008
92. Asanjarani A., Dibajian S.H., Mahdian A. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations // *Thin-Walled Structures*. 2017. Vol. 116. Pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.015
93. Kalita K., Ragavendran U., Ramachandran M., Bhoi A.K. Weighted sum multi-objective optimization of skew composite laminates // *Structural Engineering and Mechanics*. 2019. Vol. 69. Issue 1. Pp. 21–31. DOI: 10.12989/sem.2019.69.1.021
94. Fazilati J., Alisadeghi M. Multiobjective crashworthiness optimization of multi-layer honeycomb energy absorber panels under axial impact // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 107. Pp. 197–206. DOI: 10.1016/j.tws.2016.06.008
95. Yang D., Sun Y., Turrin M., Buelow P. Von, Paul J. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes : a case study // *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2015.
96. Hernández-Díaz A.M., Bueno-Crespo A., Pérez-Aracil J., Cecilia J.M. Multi-objective optimal design of submerged arches using extreme learning machine and evolutionary algorithms // *Applied Soft Computing Journal*. 2018. Vol. 71. Pp. 826–834. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.07.009
97. Sloan S.W. A fast algorithm for generating constrained delaunay triangulations // *Computers and Structures*. 1993. Vol. 47. Issue 3. Pp. 441–450. DOI: 10.1016/0045-7949(93)90239-A
98. Coello Coello C.A. Multi-objective optimization // *Handbook of Heuristics*. 2018. Pp. 177–204. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4_17
99. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 1 (77). Pp. 59–67. DOI: 10.18720/MCE.77.6
100. Korol E., Mostovoy D., Pleshivcev A. Technological parameter optimization of multilayer enclosure structures with the multiple-criteria decision analysis // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. P. 03031. DOI: 10.1051/mateconf/201817003031
101. Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Галкин С.С. Методика определения продолжительности строительства на основе эволюционного моделирования с учетом случайных организационных ожиданий // *Вестник МГСУ*. 2016. № 10. С. 120–130. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.120-130
102. Rogalska M., Bozejko W., Hejducki Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling // *Automation in Construction*. 2008. Vol. 18. Issue 1. Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.04.002

Поступила в редакцию 5 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 декабря 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Ашот Георгиевич Тамразян** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 447901; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 605775; AlekseytsevAV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Cao H., Qian X., Chen Z., Zhu H. Enhanced particle swarm optimization for size and shape optimization of truss structures. *Engineering Optimization*. 2017; 49(11):1939-1956. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1273912
2. Jain N., Saxena R. Effect of self-weight on topological optimization of static loading structures. *Alexandria Engineering Journal*. 2018; 57(2):527-535. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.006

3. Yang D., Liu H., Zhang W., Li S. Stress-constrained topology optimization based on maximum stress measures. *Computers and Structures*. 2018; 198:23-39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.008
4. Huang X., Xie Y.M. *Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications*. 2010. DOI: 10.1002/9780470689486
5. Lynn N., Ali M.Z., Suganthan P.N. Population topologies for particle swarm optimization and differential evolution. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018; 39:24-35. DOI: 10.1016/j.swevo.2017.11.002
6. Rahami H., Kaveh A., Gholipour Y. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2008; 30(9):2360-2369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.012
7. Niu C., Zhang W., Gao T. Topology optimization of continuum structures for the uniformity of contact pressures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019; 60(1):185-210. DOI: 10.1007/s00158-019-02208-8
8. Podestá J.M., Méndez C.G., Toro S., Huespe A.E., Oliver J. Material design of elastic structures using Voronoi cells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 115(3):269-292. DOI: 10.1002/nme.5804
9. Alekseytsev A.V. Evolutionary optimization of steel trusses with the nodal joints of rods. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 40(5):28-37. DOI: 10.5862/MCE.40.3 (rus.).
10. Kirsanov M.N. The deflection of spatial coatings with periodic structure. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 76(8):58-66. DOI: 10.18720/MCE.76.6
11. Kirsanov M.N. Analysis of the buckling of spatial truss with cross lattice. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 64(4):52-58. DOI: 10.5862/MCE.64.5 (rus.).
12. Komzsis L. Mathematical optimization. *Approximation Techniques for Engineers*. 2018; 331-354. DOI: 10.1201/9781315205007-14
13. Gandomi A.H., Yang X.S., Talatahari S., Alavi A.H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 2013; 1-24. DOI: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2
14. Aliawdin P., Urbańska K. Limit analysis of geometrically hardening rod systems using bilevel programming. *Procedia Engineering*. 2013; 57:89-98. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.014
15. Schröter H., Simon A., Timmler H.G., Rautenstrauch K., Raue E. Zur berechnung von holz-beton-verbundträgern mit methoden der mathematischen optimierung. *Bautechnik*. 2010; 87(8):474-481. DOI: 10.1002/bate.201010034
16. Sun J.Q., Xiong F.R., Schütze O., Hernández C. *Cell mapping methods: Algorithmic approaches and applications*. 2018; 226. DOI: 10.1007/978-981-13-0457-6
17. Lalwani S., Sharma H., Satapathy S.C., Deep K., Bansal J.C. A survey on parallel particle swarm optimization algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019; 44(4):2899-2923. DOI: 10.1007/s13369-018-03713-6
18. Perez R.E., Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization. *Computers and Structures*. 2007; 85(19-20):1579-1588. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.10.013
19. Alekseytsev A.V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 83(7):175-185. DOI: 10.18720/MCE.83.16
20. Akbulut M., Sonmez F.O. Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing. *Computers and Structures*. 2011; 89(17-18):1712-1724. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.04.007
21. Paya-Zaforteza I., Yepes V., Hospitaler A., González-Vidoso F. CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*. 2009; 31(7):1501-1508. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.034
22. Wahid F., Alsaedi A.K.Z., Ghazali R. Using improved firefly algorithm based on genetic algorithm crossover operator for solving optimization problems. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019; 36(2):1547-1562. DOI: 10.3233/JIFS-181936
23. Durbhaka G.K., Selvaraj B., Nayyar A. Firefly swarm: metaheuristic swarm intelligence technique for mathematical optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 457-466. DOI: 10.1007/978-981-13-1274-8_34
24. Manju M., Kant C. Ant colony optimization: a swarm intelligence based technique. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 73(10):30-33. DOI: 10.5120/12779-9387
25. Kaveh A., Farahmand Azar B., Hadidi A., Reza-zadeh Sorooshi F., Talatahari S. Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010; 66(4):566-574. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.11.006
26. Degertekin S.O., Lamberti L., Hayalioglu M.S. Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017; 14(3):373-397. DOI: 10.1590/1679-78253297
27. Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H., Hamdi M. Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. *Computers and Structures*. 2012; 102-103:49-63. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013
28. Mashayekhi M., Salajegheh E., Dehghani M. Topology optimization of double and triple layer grid structures using a modified gravitational harmony search algorithm with efficient member grouping strategy. *Computers and Structures*. 2016; 172:40-58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.008

29. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y. Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017; 61(3):471-82. DOI: 10.3311/PPci.8125
30. Alekseytsev A.V., Akhremenko S.A. Evolutionary optimization of prestressed steel frames. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 81(5):32-42. DOI: 10.18720/MCE.81.4
31. Abdi M., Ashcroft I., Wildman R. Topology optimization of geometrically nonlinear structures using an evolutionary optimization method. *Engineering Optimization*. 2018; 50(11):1850-1870. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1418864
32. Abouhamze M., Shakeri M. Multi-objective stacking sequence optimization of laminated cylindrical panels using a genetic algorithm and neural networks. *Composite Structures*. 2007; 81(2):253-263. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.08.015
33. Cardozo S.D., Gomes H.M., Awruch A.M. Optimization of laminated composite plates and shells using genetic algorithms, neural networks and finite elements. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2011; 8(4):413-427. DOI: 10.1590/S1679-78252011000400003
34. Shirakawa S., Iwata Y., Akimoto Y. Dynamic optimization of neural network structures using probabilistic modeling. *32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018*. 2018.
35. Yang C., Xu P., Yao S., Xie S., Li Q., Peng Y. Optimization of honeycomb strength assignment for a composite energy-absorbing structure. *Thin-Walled Structures*. 2018; 127:741-755. DOI: 10.1016/j.tws.2018.03.014
36. Muc A., Gurba W. Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures. *Composite Structures*. 2001; 54(2-3):275-281. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00098-8
37. Coelho P.G., Guedes J.M., Rodrigues H.C. Multiscale topology optimization of bi-material laminated composite structures. *Composite Structures*. 2015; 132:495-505. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.059
38. Blasques J.P., Stolpe M. Multi-material topology optimization of laminated composite beam cross sections. *Composite Structures*. 2012; 94(11):3278-3289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.002
39. Suresh S., Sujit P.B., Rao A.K. Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design. *Composite Structures*. 2007; 81(4):598-605. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.10.008
40. Lin J.P., Wang G., Xu R. Particle swarm optimization-based finite-element analyses and designs of shear connector distributions for partial-interaction composite beams. *Journal of Bridge Engineering*. 2019; 24(4):04019017. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371
41. Kaveh A., Ghafari M.H., Gholipour Y. Optimum seismic design of steel frames considering the connection types. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 130:79-87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.002
42. Myasnichenko V., Sdobnyakov N., Kirilov L., Mikhov R., Fidanova S. Monte Carlo approach for modeling and optimization of one-dimensional bimetallic nanostructures. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2019; 133-41. DOI: 10.1007/978-3-030-10692-8_15
43. Guo Z., Zhu F., Wang Y., Chang H. Optimization analysis on steel frame with short-limb steel plate composite shear wall. *Progress in Steel Building Structures*. 2017; 19(4):36-42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.04.005
44. Cazacu R., Grama L. Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA. *Procedia Technology*. 2014; 12:339-346. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.496
45. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Duong-Gia D., Nguyen-Thoi T. An efficient procedure for lightweight optimal design of composite laminated beams. *Steel and Composite Structures*. 2018; 27(3):297-310. DOI: 10.12989/scs.2018.27.3.297
46. Erbatur F., Hasançebi O., Tütüncü İ., Kılıç H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. *Computers and Structures*. 2000; 75(2):209-224. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00084-X
47. Chen M., Zhao Y., Xie Y. Topology optimization and additive manufacturing of nodes in spatial structures. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2019; 52(2):1-10.
48. Hassanzadeh A., Gholizadeh S. Collapse-performance-aided design optimization of steel concentrically braced frames. *Engineering Structures*. 2019; 197:109411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109411
49. Sarma K.C., Adeli H. Life-cycle cost optimization of steel structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002; 55(12):1451-1462. DOI: 10.1002/nme.549
50. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y., Kurchenko N.S. Flat rod systems: Optimization with overall stability control. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 76(8):181-192. DOI: 10.18720/MCE.76.16
51. Zhang C., Tian Y. Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings. *Engineering Structures*. 2019; 185:15-25. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.108
52. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704005
53. Amir O. A topology optimization procedure for reinforced concrete structures. *Computers and*

Structures. 2013; 114-115:46-58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.011

54. Yeo D., Gabbai R.D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. *Energy and Buildings*. 2011; 43(8):2028-2033. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.04.014

55. Lee C.K., Kim S.K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks. *Automation in Construction*. 2007; 16(2):153-164. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.03.001

56. Tamrazyan A.G., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00163. DOI: 10.1051/mateconf/201711700163

57. Esfandiari M.J., Urgessa G.S., Sheikholarefin S., Manshadi S.H.D. Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMPPO algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2018; 115:149-160. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.09.007

58. Kulkarni A.R., Bhusare V. Structural optimization of reinforced concrete structures. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2016; V5(07). DOI: 10.17577/ijertv5is070156

59. Tamrazyan A.G., Dolganov A.I., Kaleev D.I., Zhikharev F.K., Zvonov Yu.N., Zubareva S.E., Ubysh A. On the probabilistic assessment of the reliability of multi-hollow reinforced concrete floor panels. *News of higher educational institutions. Textile technology*. 2017; 4 (370):267-271. (rus.).

60. Tamrazyan A.G. An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Bulletin TSNIISK them. V.A. Kucherenko «Studies in the theory of structures»*. 2009; 1:160-171. (rus.).

61. Bruggi M. A numerical method to generate optimal load paths in plain and reinforced concrete structures. *Computers and Structures*. 2016; 170:26-36. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.03.012

62. Kaveh A., Zakian P. Optimal seismic design of Reinforced Concrete shear wall-frame structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014; 18(7):2181-2190. DOI: 10.1007/s12205-014-0640-x

63. Yeo D., Potra F.A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization. *Journal of Structural Engineering (United States)*. 2015; 141(3). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000888

64. Bulgakov S.N., Tamrazyan A.G., Rakhman I.A., Stepanov A.Yu. *Risk reduction in construction during emergency situations of natural and technogenic character* / ed. Tamrazyana A.G. Moscow, ASV Publ., 2012; 304. (rus.).

65. Mayencourt P., Mueller C. Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way

bending. *Structures*. 2019; 18:48-59. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.12.009

66. Yamaguchi T., Hasemi Y., Kamikawa D., Suzuki J.I. Optimization of the wood-based fire protection layer — An engineering approach to the design of fire-resistant building elements based on a sacrifice-layer concept. *WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering*. 2018.

67. Chahade T., Schober K.U., Morillas L. Structural design optimization of multidimensional gridshells: Parametric interaction of architecture, engineering and manufacturing. *WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering*. 2018.

68. Alekseytsev A., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost minimization for safety enhancing of timber beam structures in historical buildings. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03002. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703002

69. Loebjinski M., Pasternak H., Köhler J., Rug W. Development of an optimization-based and practice-orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures. *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision — Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018*. 2019.

70. Šilih S., Premrov M., Kravanja S. Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility. *Engineering Structures*. 2005; 27(1):145-154. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.10.001

71. Aoues Y., Chateaneuf A. Reliability-based optimization of structural systems by adaptive target safety — Application to RC frames. *Structural Safety*. 2008; 30(2):144-161. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.10.002

72. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. *Procedia Engineering*. 2016; 153:715-720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

73. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of steel frame building systems in terms of parameters and reliability requirements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052003. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052003

74. Khatibinia M., Salajegheh E., Salajegheh J., Fadaee M.J. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel. *Engineering Optimization*. 2013; 45(10):1147-1165. DOI: 10.1080/0305215X.2012.725051

75. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions. *Applied Mechanics and Mate-*

rials. 2013; 467:404-409. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.404

76. García-Segura T., Yepes V., Frangopol D.M., Yang D.Y. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges. *Engineering Structures*. 2017; 145:381-391. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.013

77. Ghasemi S.H., Nowak A.S. Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state. *Engineering Structures*. 2017; 152:226-237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.012

78. Li G., Hu H. Risk design optimization using many-objective evolutionary algorithm with application to performance-based wind engineering of tall buildings. *Structural Safety*. 2014; 48:1-14. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.01.002

79. Beck A.T., Verzenhassi C.C. Risk optimization of a steel frame communications tower subject to tornado winds. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2008; 5(3):187-203.

80. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704005

81. Li C.Q., Ian Mackie R., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007; 22(5):335-346. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x

82. Gardoni P. Risk and reliability analysis. *Springer Series in Reliability Engineering*. 2017; 3-24. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_1

83. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost. *Structural Safety*. 2014; 48:40-50. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.02.002

84. Schneiderova-Heralova R. Importance of life cycle costing for construction projects. *Engineering for Rural Development*. 2018; 1223-1227. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N405

85. Lagaros N.D., Karlaftis M.G. Life-cycle cost structural design optimization of steel wind towers. *Computers and Structures*. 2016; 174:122-132. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.09.013

86. Navarro I.J., Yepes V., Martí J.V. Life cycle cost assessment of preventive strategies applied to pre-stressed concrete bridges exposed to chlorides. *Sustainability (Switzerland)*. 2018; 10(3):845. DOI: 10.3390/su10030845

87. Vitiello U., Asprone D., Di Ludovico M., Prota A. Life-cycle cost optimization of the seismic retrofit of existing RC structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017; 15(5):2245-2271. DOI: 10.1007/s10518-016-0046-x

88. Nie J., Tao M., Huang Y., Tian S., Chen G. Research advances of steel-concrete composite structural systems. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*. 2010; 31(6):71-80.

89. Ramin H., Hanafizadeh P., Ehterami T., AkhavanBehabadi M.A. Life cycle-based multi-objective optimization of wall structures in climate of Tehran. *Advances in Building Energy Research*. 2019; 13(1):18-31. DOI: 10.1080/17512549.2017.1344137

90. Greiner D., Periaux J., Emperador J.M., Galván B., Winter G. Game theory based evolutionary algorithms: a review with nash applications in structural engineering optimization problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017; 24(4):703-750. DOI: 10.1007/s11831-016-9187-y

91. Pourzeynali S., Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 311(3-5):1141-1160. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.008

92. Asanjarani A., Dibajian S.H., Mahdian A. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations. *Thin-Walled Structures*. 2017; 116:26-36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.015

93. Kalita K., Ragavendran U., Ramachandran M., Bhoi A.K. Weighted sum multi-objective optimization of skew composite laminates. *Structural Engineering and Mechanics*. 2019; 69(1):21-31. DOI: 10.12989/sem.2019.69.1.021

94. Fazilati J., Alisadeghi M. Multiobjective crashworthiness optimization of multi-layer honeycomb energy absorber panels under axial impact. *Thin-Walled Structures*. 2016; 107:197-206. DOI: 10.1016/j.tws.2016.06.008

95. Yang D., Sun Y., Turrin M., Buelow P. Von, Paul J. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes : a case study. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2015.

96. Hernández-Díaz A.M., Bueno-Crespo A., Pérez-Aracil J., Cecilia J.M. Multi-objective optimal design of submergible arches using extreme learning machine and evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing Journal*. 2018; 71:826-834. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.07.009

97. Sloan S.W. A fast algorithm for generating constrained delaunay triangulations. *Computers and Structures*. 1993; 47(3):441-450. DOI: 10.1016/0045-7949(93)90239-A

98. Coello Coello C.A. Multi-objective optimization. *Handbook of Heuristics*. 2018; 177-204. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4_17

99. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1(77):59-67. DOI: 10.18720/MCE.77.6.

100. Korol E., Mostovoy D., Pleshivcev A. Technological parameter optimization of multilayer enclosure structures with the multiple-criteria decision analysis. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:03031. DOI: 10.1051/mateconf/201817003031

101. Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Galkin S.S. Method for determining the duration of construction basing on evolutionary modeling taking into account random organizational expectations.

Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 10:120-130. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.120-130 (rus.).

102. Rogalska M., Bozejko W., Hejducki Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling. *Automation in Construction*. 2008; 18(1):24-31. DOI: 10.1016/j.aut-con.2008.04.002

Received August 5, 2019.

Adopted in a revised form on September 16, 2019.

Approved for publication December 27, 2019.

B I O N O T E S : **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 447901; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Anatoly V. Alekseytsev — Candidate of Technical Sciences, Professor Assistant, Professor Assistant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 605775; AlekseytsevAV@mgsu.ru.

Влияние горизонтальных нагрузок на работу стэд-болтов в комбинированных плитах перекрытия

А.И. Фаттахова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Комбинированные перекрытия часто применяются в гражданских зданиях. Способы расчета данных конструкций подробно описаны в отечественной и зарубежной нормативных базах. Детально изучена работа перекрытий от вертикальных нагрузок, однако в отечественной практике проектирования не учитываются дополнительные сдвигающие усилия в болтах от горизонтальных нагрузок. Использование зарубежных методик ограничивается применением профилированного настила в качестве основного армирования. Кроме того, применяемые за рубежом типы профилированных настилов отличаются от отечественных.

Материалы и методы. Для изучения влияния горизонтальных нагрузок на гибкие анкеры комбинированного перекрытия с использованием профилированного настила рассмотрен пример каркаса существующего здания. Представлена его модель в ПК ЛИРА-САПР.

Результаты. Результаты численных экспериментов были описаны с точки зрения влияния ветровой нагрузки и температуры на структуру. Получены значения усилий в гибких связях от приложенных нагрузок при различных условиях работы. Определена доля этих усилий по сравнению с усилиями от вертикальных нагрузок и несущей способности одного стэд-болта. Рассмотрен вопрос определения несущей способности по отечественным и зарубежным нормам проектирования, а также по нормативным документам предприятий — производителей изучаемых анкеров. Установлены отличные друг от друга значения несущей способности. Приведены возможные причины большого расхождения значений на основе расчетных формул, представленных в документах для определения нагрузки, выдерживаемой одним болтом.

Выводы. Выявлена необходимость дальнейшего изучения вопроса обеспечения сдвиговой жесткости стэд-болтов от горизонтальных нагрузок. На распределение усилий в гибких анкерах влияет расположение балок перекрытия и связей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стэд-болт, сдвиговая жесткость, горизонтальные нагрузки, усилия сдвига, ветровая нагрузка, температурное воздействие, несущая способность гибкого анкера

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фаттахова А.И. Влияние горизонтальных нагрузок на работу стэд-болтов в комбинированных плитах перекрытия // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 31–42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42

Impact of horizontal loads on the work of stud bolts in combined floor slabs

Alsou I. Fattakhova

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

ABSTRACT

Introduction. Combined slabs are often applied in civil buildings. Such methods of slab calculation are described in detail in internal and international normative documents. The work of the slabs under vertical loads is studied minutely. However, additional shear forces in stud bolts from horizontal load are not considered in domestic design practice. The usage of profiled sheeting as the main reinforcement limits the application of international foreign methods is limited by. Besides that, the profiled sheeting types used abroad differ from domestic ones.

Materials and methods. The paper studies the horizontal load impact on the flexible anchors in combined slabs using profiled sheeting. The article considered an example of an existing building structure modelled using a LIRA-SAPR software system.

Results. The results of numerical experiments were described in terms of wind load and temperature effect on the structure. The values of stud bolt forces from the applied loads were obtained for various working conditions. Further, these forces were compared with the ones from the vertical loads and bearing capacity of a single stud bolt. The bearing capacity determining issue was separately considered according to domestic and foreign design standards as well as stud manufacturers' regulatory documents. As a result, different bearing capacity values were obtained. Possible reasons for the large discrepancy of the values are given based on calculation formulae taken from documents for determining a load that a single bolt is capable of bearing.

Conclusions. A necessity of further studying the issue of providing shear rigidity of stud bolts under horizontal loads was revealed. The distribution of forces in the flexible anchors is affected by the arrangement of floor beams and ties.

KEYWORDS: stud bolt, shear rigidity, horizontal loads, shear forces, wind load, temperature effect, flexible anchor bearing capacity

FOR CITATION: Fattakhova A.I. Impact of horizontal loads on the work of stud bolts in combined floor slabs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):31-42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают многоэтажные стальные каркасы гражданских зданий. Стальные каркасы могут включать комбинированные перекрытия по балкам, выполняемые с применением профилированного настила в качестве несъемной опалубки. Расчеты комбинированных перекрытий довольно подробно и широко раскрыты в существующей отечественной и зарубежной нормативной базе. При этом проверочные расчеты в основном сосредоточены на обеспечении адгезии между профилированным настилом, работающим в качестве арматуры, и бетоном, поскольку при потере адгезии произойдет нарушение предполагаемой работы комбинированного перекрытия от вертикальных нагрузок. В зарубежной практике также имеется раздел расчетов комбинированных перекрытий с учетом действия горизонтальных нагрузок на каркас здания. К таким нагрузкам можно отнести в основном ветровые и сейсмические. В отечественной практике проектирования дополнительные сдвигающие усилия в болтах от горизонтальных нагрузок никак не учитываются. Тем не менее при определенном сочетании нагрузок сдвигающие усилия в болтах от вертикальных нагрузок могут быть дополнены сдвигающими усилиями от горизонтальных нагрузок. Последние в значительной степени зависят от конфигурации зданий, его конструктивных особенностей. Следовательно, в отдельных случаях горизонтальные нагрузки могут оказать определяющее значение на несущую способность болтов и конструкции в целом.

Актуальность темы обосновывается практически полным отсутствием исследований в данной области в отечественной практике расчетов. Использование зарубежных методик ограничивается тем, что применяются отличные от отечественных типы профилированных настилов, а также использованием профилированного настила в качестве основного армирования. Изучение данной области с учетом особенностей проектирования и требований норм позволит повысить качество расчетов каркасов зданий упомянутых выше.

В связи с вышеизложенным было проведено исследование, заключавшееся в расчете каркаса здания на горизонтальные нагрузки. Далее были определены усилия в гибких связях, которые сравнивались с несущей способностью, вычисленной по различным нормативным документам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — определение доли горизонтальных нагрузок в несущей способности гибких анкеров в комбинированном перекрытии с использованием профилированного настила. Проанализированы обзорные статьи с приведением опыта проектирования сталежелезобетонных перекрытий в мировой практике [1, 2]. Особый интерес вызвала статья, написанная группой ученых под руководством М. Колиоу [3], где рассматривались здания с податливыми перекрытиями и жесткими стенами. В данной работе описаны характеристики, которые влияют на степень податливости перекрытия. Учитывая интерес к работе именно гибких анкеров и их податливости, были изучены статьи [4–6], посвященные работе одиночных стад-болтов и их групп при различных условиях закрепления и самой геометрии болтов. Однако в вышеупомянутых статьях не было четких указаний по поведению болтов при динамических и циклических нагрузках, которые ужесточают требования к надежности соединений в перекрытиях. В связи с этим была найдена статья [7], в которой описывается поведение стад-болтов при циклических нагрузках. Интерес к данной публикации вызван подробным описанием результатов испытаний, а также наличием рекомендаций по проектированию гибких анкеров при наличии динамики.

Следующим этапом стал выбор модели для того, чтобы увидеть описанные в указанных работах явления, поэтому были изучены типовые варианты гражданских зданий, представленные на сайтах проектных организаций, а также здания, уже введенные в эксплуатацию. Среди всех рассмотренных каркасов наибольший интерес вызвал проект парковки, представленный на сайте Ассо-

циации развития стального строительства (APCC). Данное здание построено в 2014–2015 гг. в г. Москве (ул. Митинская, вл. 22). Паркинг рассчитан на 1370 машин, состоит из трех блоков и четырех пролетов по 5,7 и 12,6 м, общая длина здания составляет 137,8 м.

Здание интересно расположением балок перекрытия, которые были установлены только в одном направлении, т.е. не образовывали единый контур, что видно из рис. 1. Вдоль здания на уровне перекрытий имеются стержни квадратного коробчатого сечения, образующие единый контур совместно с балками перекрытия на уровне дисков перекрытий.

Стад-болты, обеспечивающие сдвиговую жесткость дисков перекрытий, расположены исключительно над балками, т.е. не образуют замкнутый контур. Здание имеет достаточную высоту 25,920 м для горизонтального ветрового воздействия, кроме того, машины внутри здания также могут создавать горизонтальное воздействие на диск перекрытия. Поэтому в качестве основы модели здания для проведения численного эксперимента выбран именно этот проект парковки.

Прежде чем создавать собственную модель были исследованы нюансы проектирования сталежелезобетонных конструкций, их расчета и особенности задания расчетной схемы в программных комплексах. Комбинированные перекрытия чаще применяются и, следовательно, изучены подробнее в США, а именно в Институте стальных перекрытий (Steel Deck Institute) под руководством команды Люттрелла, поэтому было рассмотрено его руководство по проектированию подобных пере-

крытий [8]. Среди работ отечественных ученых проанализированы статьи В.С. Туснина [9], А.Г. Тамразяна и Е.А. Филимоновой [10] для рассмотрения возможных конструктивных решений перекрытия и определения характера работы плит перекрытий на сдвиг.

С учетом изученного материала получена модель рассматриваемого здания в ПК ЛИРА-САПР, представленная на рис. 2. Данная модель здания загружалась горизонтальными воздействиями от ветрового давления и температурного перепада. Каркас здания моделировался стержнями, диск перекрытия пластинами, однако возник вопрос с определением приведенной толщины пластин.

При моделировании перекрытия возник вопрос о необходимости упрощения задачи для облегчения вычислений. Требовалось учитывать совместность работы бетона и стальных конструкций, кроме того, верно замоделировать гибкие связи. В связи с чем была рассмотрена статья [11], в которой приводятся рекомендации и примеры различных способов моделирования стад-болтов.

Для определения приведенной толщины перекрытия был замоделирован участок размером 6×6 м. Идея заключалась в создании базовой модели с учетом всех элементов, входящих в состав перекрытия, определении перемещений от единичных горизонтальных усилий, а также в создании аналогичной модели, только с использованием пластин, моделирующих бетон и профлист. Далее путем изменения толщины пластин следовало получить такие же значения перемещений узлов, что и в базовом образце (рис. 3).

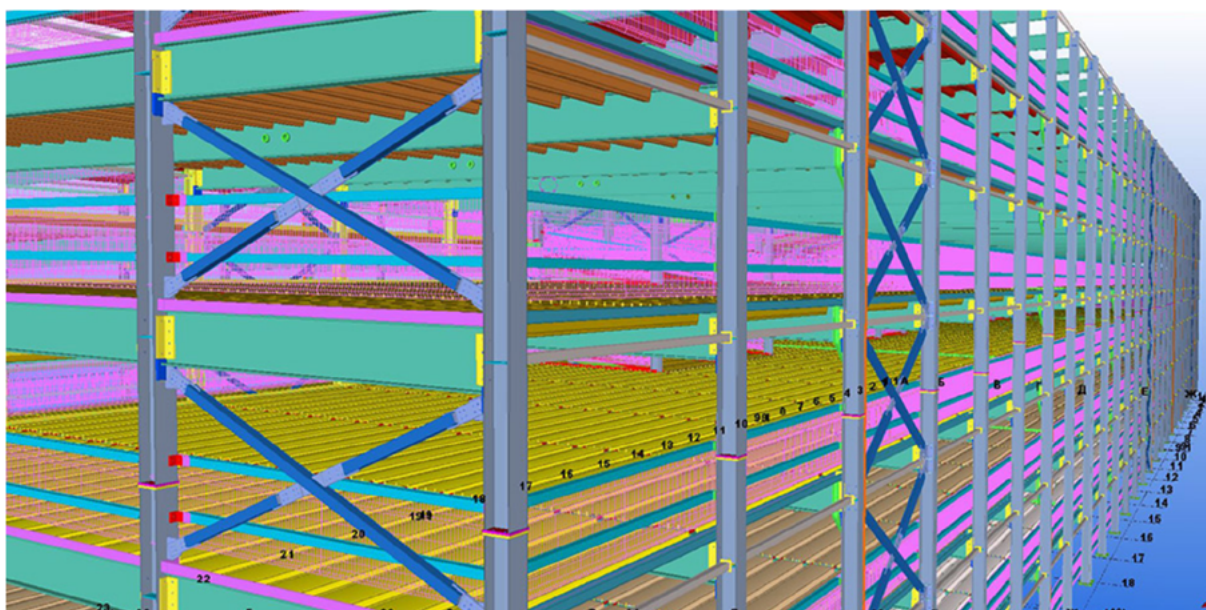


Рис. 1. Расположение несущих конструкций

Fig. 1. Arrangement of load-bearing structures

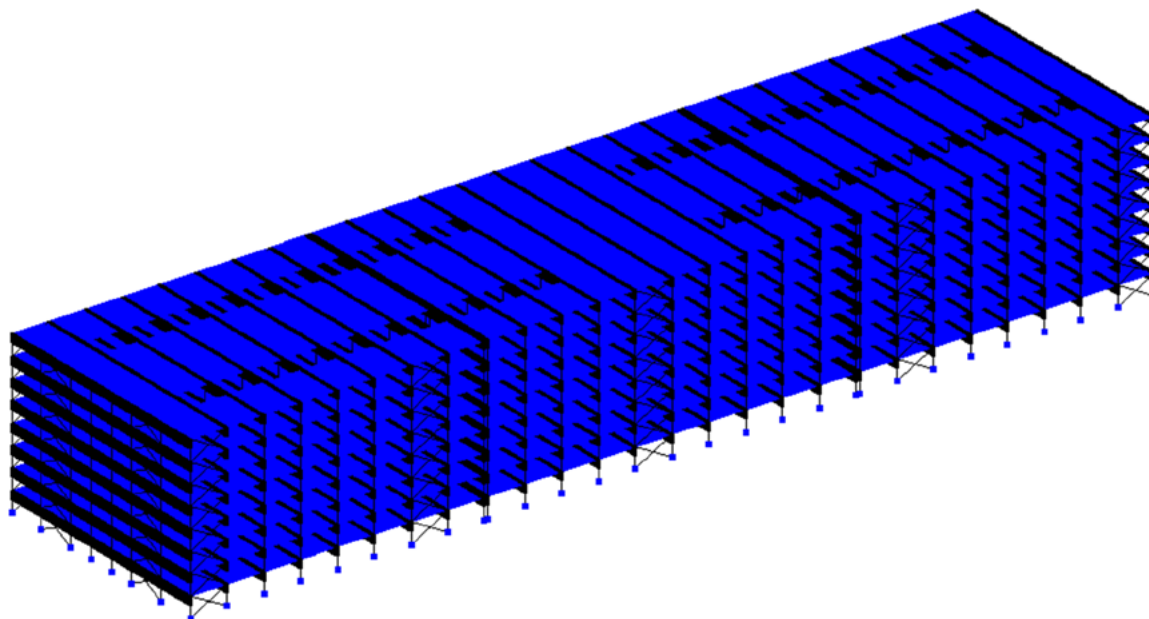


Рис. 2. Модель здания

Fig. 2. Building model

В базовом образце бетон моделировался объемными элементами размером $\sim 30 \times 40 \times 100$ мм, пластинами $\sim 40 \times 100$ мм — профлист. Стержни моделировали стад-болты, высота которых принята 300 мм (от центра тяжести сечения балки до центра тяжести перекрытия), диаметр болта принят равным 20 мм. Стад-болты работают на срез и сдвиг в месте крепления болта к профилированному листу и балке, поэтому 90 % длины стержней заменены жесткой вставкой для предотвращения изгиба. Рассматриваемая часть перекрытия была оперта с двух сторон на балки двутаврового сечения, также моделированные стержнями.

Образец загружался единичным горизонтальным усилием для определения перемещений. После чего элементы перекрытия были заменены на пластины размером 170×100 мм. Жесткостные характеристики профлиста приведены к бетону. Методом аппроксимации определено, что комбинированное перекрытие толщиной 380 мм может быть заменено пластинами толщиной 107 мм. Значения полученных перемещений отличались на 0,09 % от перемещений исходного образца.

Таким образом, в модели здания жесткость пластин перекрытия была приведена к бетону и задана толщина перекрытия, равная 107 мм, что позволило значительно упростить задачу, так как в противном случае пришлось бы моделировать перекрытие каждого этажа объемными элементами.

После создания исходной модели здания в виде, предусмотренном проектом, отдельно прикладывались ветровые нагрузки и температурные

воздействия. Отсюда появились две серии горизонтально нагруженных зданий (вертикальные нагрузки в данной модели не рассматривались). В задачах с ветровой нагрузкой моделировали здание целиком. В задачах с температурным воздействием рассматривался только крайний блок, так как усилия возникают лишь в границах одного блока, не распространяясь на соседние.

При решении задачи с температурным воздействием было замечено, что характер деформирования каркаса при рассмотрении всех блоков отличается от деформаций одного, т.е. связи, предусмотренные проектом в отдельном крайнем блоке, не обеспечивали необходимую жесткость. Поэтому было принято решение рассмотреть вариацию с расположением связей не только по одному торцу и по продольным сторонам здания, но и вариант, когда связи обеспечивали жесткость каркаса отдельного блока.

Кроме того, проектное решение предусматривало опору перекрытия на ригели, расположенные исключительно поперек здания. Соответственно, при моделировании изначально предусматривались балки только в одном направлении. Изучение опыта проектирования зданий с подобными перекрытиями показало, что чаще предусматривается опирание диска перекрытия по периметру. Отсюда появились вариации со способом опирания плиты на ригели.

Таким образом, было получено восемь образцов, включая базовый. Схема с варьируемыми параметрами представлена на рис. 4. Все образцы рассчитаны на ПК ЛИРА-САПР.

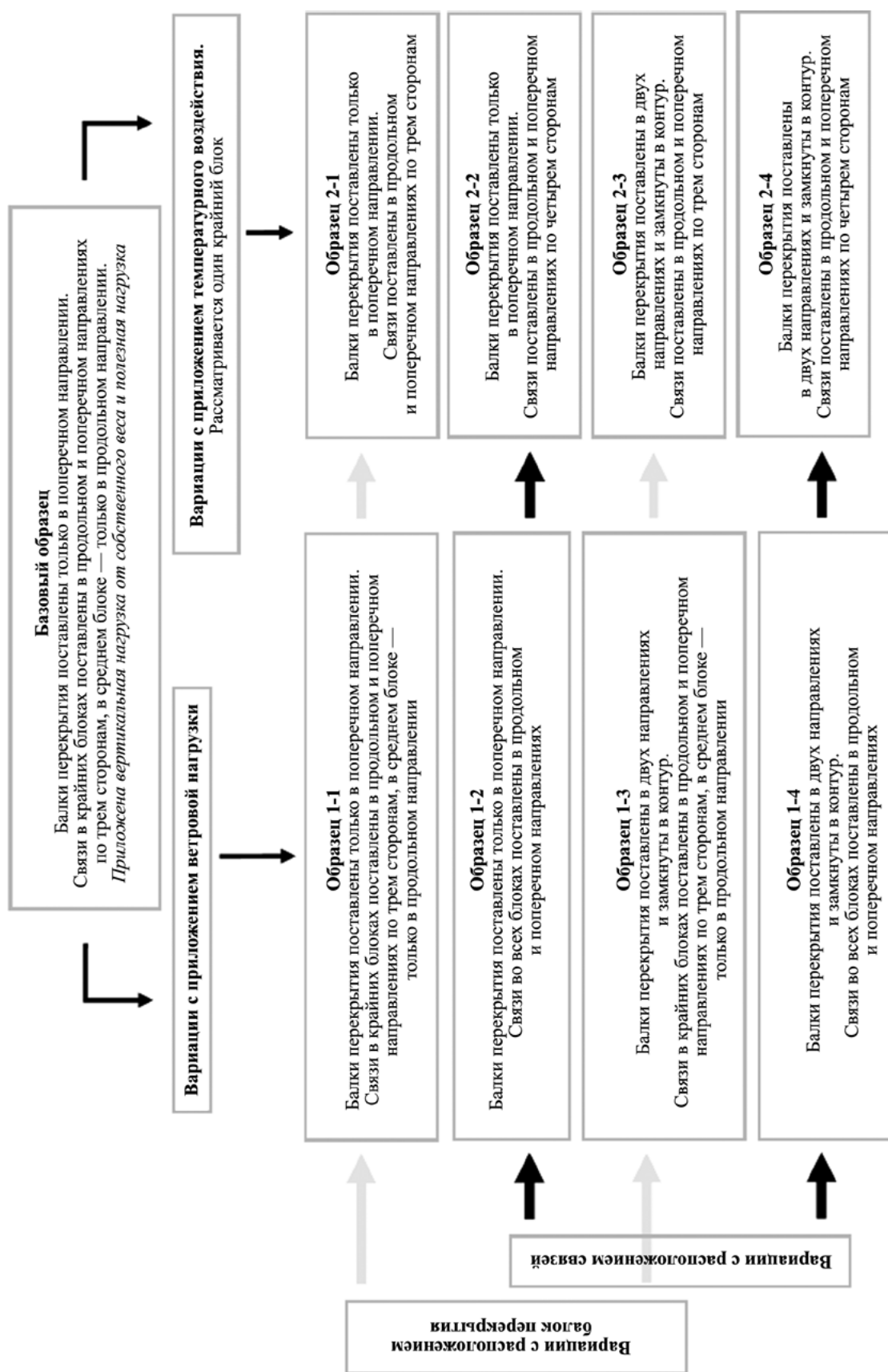


Рис. 3. Схема численного эксперимента

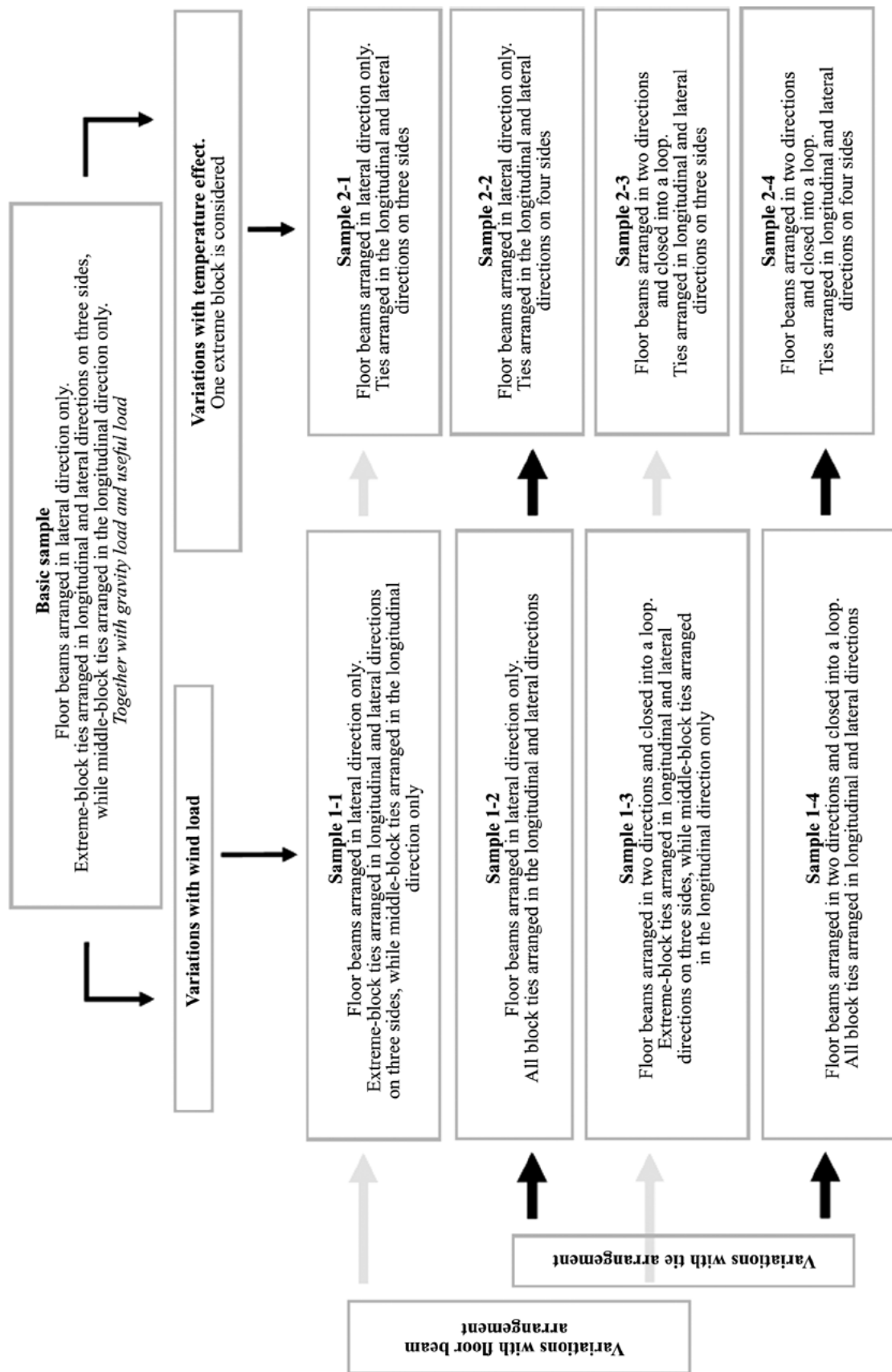


Fig. 3. Diagram of numerical experiment

Полученные результаты численных экспериментов необходимо проверить на достоверность. Для этого принято решение сравнить их с результатами подобных натурных экспериментов, а также рассчитать перекрытие вручную.

При сравнении полученных результатов с данными испытаний, описанными в трудах [1, 2], использована статья [12], в которой даны пояснения в различиях результатов натурных испытаний образцов и численных испытаний каркасов. Другой полезной статьёй стала работа В.В. Михаськина, М.А. Карачевой [13], которая позволила удостовериться в верности полученных результатов при помощи проверки ручным расчетом.

В процессе анализа полученных результатов появилась необходимость удостовериться в их правильности, для этого проанализирована статья [14], в которой приводилось описание характера напряженно-деформированного состояния (НДС) комбинированных перекрытий при их совместной работе с балками.

Для расчета перекрытия применялись нормативные документы, а именно СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» и Еврокод 4 «Проектирование сталежелезобетонных конструкций» (EN 1994-1-1-2009). При выполнении расчетов по отечественным нормативам понадобились уточнения по совместной работе бетона и стального профилированного настила, которые были найдены в трудах Э.Л. Айрумяна и Ф.С. Замалиева [15, 16].

При расчетах по Еврокоду возникло множество вопросов по необходимым расчетам и определениям характеристик материалов, в связи с чем большая часть расчета выполнялась по переводу Руководства Джонсона [17]. Дополнительно изучена статья [18], так как руководство не уточняло как производить оценку жесткости перекрытия при температурном воздействии.

Отдельно хотелось бы отметить, что при расчете внимание уделялось определению усилий в анкерах от горизонтальных нагрузок. Здесь же уточним, что в отечественных нормах данный вопрос упомянут только вскользь, поэтому была использована работа Ф.С. Замалиева, посвященная оценке прочности анкеров [19].

При сравнении полученных при ручном расчете усилий согласно СП и Еврокоду была рассмотрена статья В.О. Алмазова и С.Н. Арутюняна [20], в которой приведены комментарии к различиям способов расчета и предпосылкам нормативных документов. Собственно, именно по этой причине значения и различались.

Следующим этапом стало определение несущей способности одного стад-болта с дальнейшим

определением будет ли достаточной несущая способность с учетом горизонтальной составляющей. Для чего была определена несущая способность одного болта по Еврокоду 4 «Проектирование сталежелезобетонных конструкций» (EN 1994-1-1-2009) и СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Оба нормативных документа рассматривают прочность анкера на срез и сдвиг. При определении прочности по Еврокоду рассматриваются два возможных отказа анкера вне зависимости от вида сечения: по металлу анкера

$$P_{rd} = \frac{0,8f_u\pi d^2}{\gamma_V}$$

и раскалыванию бетона

$$\frac{0,29\alpha d^2\sqrt{f_{ck}E_{am}}}{\gamma_V}.$$

СП же разделяет разрушение анкеров из прокатных швеллеров, уголков

$$P_{rd} = 0,55(t_{fr} + 0,5t_w)b_{dr}\sqrt{10R_b}$$

и упоров из стержней круглого сечения

$$P_{rd} = 0,24d_{an}\sqrt{10R_b} \text{ при } 2,5 \leq l/d \leq 4,2,$$

$$P_{rd} = d_{an}^2\sqrt{10R_b} \text{ при } l/d > 4,2.$$

Оба нормативных документа определяют несущую способность с помощью эмпирических формул. Отличие заключается в том, что Еврокод разделяет возможность разрушения металла и раскалывания бетона. А СП дает общую формулу, которая, судя по обозначениям, учитывает оба фактора.

Анализ использования различных конструктивных решений по гибким анкерам показал, что наиболее часто в проектах предусматриваются болты фирмы Hilti ввиду их оптимального соотношения цены и качества. Более подробное изучение нормативной документации по данным анкерам продемонстрировало, что программа по определению типа и количества анкеров, разработанная компанией, основывается на СТО 36554501-048-2016*.

В СТО расписывается большая возможность отказа не только от превышения предела прочности по стали, но и разрушение от выкалывания бетона основания, раскалывания основания, разрушение контакта анкера с основанием, а также возможность разрушения одновременно по контакту и выкалыванию бетона основания. Кроме того, освещен вопрос совместного действия растягивающих и сдвигающих усилий (п. 6.3). Согласно формулам

$$\beta_N \leq 1,20, \beta_V \leq 1,0, (\beta_N)^{1,5} + (\beta_V)^{1,5} \leq 1,0, \\ \beta_N + \beta_V \leq 1,2,$$

сумма коэффициентов от растягивающих и сдвигающих усилий должна быть меньше 1,2. Коэффициенты определяются соотношением максимального растягивающего и сдвигающего усилий к соответствующей минимальной несущей способности соединения.

$$\beta_N = \max \left\{ \frac{N_{an}}{N_{ult,s}}; \frac{N_{an}}{N_{ult,p}}; \frac{N_{an}}{N_{ult,c}}; \frac{N_{an}}{N_{ult,sp}} \right\};$$

$$\beta_V = \max \left\{ \frac{V_{an}}{V_{ult,s}}; \frac{V_{an}}{V_{ult,cp}}; \frac{V_{an}}{V_{ult,c}} \right\}.$$

Полученные значения несущей способности анкера с использованием различных норм позволили оценить являются ли гибкие связи достаточно прочными для восприятия как вертикальных, так и горизонтальных усилий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рассмотренных моделях зданий нас интересовала работа гибких анкеров (стад-болтов), поэтому усилия и перемещения, полученные в каждом образце, для наглядности были выписаны и приведены в табл. 1. Отметим, что в таблице указаны максимальные значения перемещений и усилий в образце.

Усилия в анкерах по длине балок близки к нулю, за исключением тех, которые находятся непосредственно над колонной или связью, в этих анкерах и получаются максимальные значения усилия, приведенные в таблице. То есть вероятность разрушения стыка в местах крепления плиты к каркасу максимальна. Причем в серии образцов, где исследовались все три блока, наибольшие усилия и перемещения наблюдались в среднем блоке.

Если рассматривать распределение максимальных усилий по этажам, то наблюдается следующая

закономерность: при температурном воздействии наибольшие усилия в болтах приблизительно одинаковы на всех этажах. В то время как при рассмотрении ветровой нагрузки явно прослеживается зависимость максимальных усилий от этажа: чем выше находится перекрытие, тем более нагружены стад-болты, что вполне логично — ветровая нагрузка возрастает с увеличением высоты. Таким образом, в таблице приведены максимальные усилия по угловым болтам крайних балок покрытия. Усилия по направлению Oz и Oy приводились с одних и тех же болтов, так как в дальнейшем усилия суммировались.

Перейдем к рассмотрению каждой серии образцов по отдельности в зависимости от вида прикладываемой нагрузки. На первых четырех образцах изучалось влияние ветровой нагрузки.

Обратимся к суммарному значению усилий, полученных путем сложения векторов Qz и Qy . Усилия при замыкании контура становятся больше на 36–40 % в зависимости от постановки связей, причем отсутствие связей по одной из сторон дает возможность уменьшить усилия. Обеспечение необходимой жесткости каждого блока по отдельности приводит к ухудшению работы болтов в поперечных балках здания: усилия возрастают практически в два раза. И в тоже время происходит разгружение анкеров продольных балок, тоже примерно в два раза. Итак, можно сделать вывод, что постановкой балок лишь в одном направлении можно достигнуть более равномерного распределения усилий в стад-болтах при действии ветровой нагрузки. Более подробное изучение схемы позволило определить, что максимальное значение достигается в противоположных угловых анкерах. Данное явление объясняется тем, что в плите касательные напряжения создают усилия в анкерах, а векторы касательных напряжений направлены как раз из противоположных углов.

Табл. 1. Значения усилий и перемещений в образцах

Table 1. Values of forces and displacements in samples

Номер образца	Перемещения по Ox , мм	Перемещения Oy , мм	Усилия в болте Qz , кН	Усилия в болте Qy , кН	Суммарное значение усилия в болте Q , кН
1-1	0,507	7,36	0,379	7,29	7,3
1-2	0,03	7,32	0,317	7,25	7,26
1-3	0,390	8,69	9,48	6,32	11,39
1-4	0,304	7,68	4,78	11,03	12,02
2-1	20,1	16	151,35	190,46	243,27
2-2	20,1	16	155,24	189,9	245,28
2-3	19,5	16	255,5	186,8	316,5
2-4	19,5	16,5	255,5	186,8	316,5

Если рассмотреть перемещения по оси Ox , то можно заметить, что не только усилия, но и перемещения максимальны в этих же анкерах. При изучении перемещений в перпендикулярном направлении становится понятно, что замыкание балок в единый контур позволяет уменьшить перемещения на 23–40 % в зависимости от постановки связей. Отдельно отметим, что отсутствие замкнутого контура практически не влияет на перемещения по направлению ветровой нагрузки.

Теперь перейдем к исследованию образцов с температурным воздействием. Постановка связей практически не влияет на распределение усилий в стад-болтах. Что касается влияния замыкания балок перекрытия в единый контур, то продольные усилия при замыкании контура уменьшаются на 1,6 %; перемещения по оси Ox уменьшаются на 0,6 мм, что составляет около 3 %.

Сравнивая усилия от ветровой и температурных воздействий при прочих равных условиях, можно прийти к выводу, что температурное воздействие больше влияет на работу стад-болтов.

Для определения доли горизонтальной нагрузки в болтах был произведен расчет базового образца. Модель здания испытывала нагрузки от собственного веса и движения машин. В результате расчета были получены усилия в болтах от вертикальной нагрузки. Зная значение вертикальных усилий из расчета базового образца, были вычислены доли горизонтальных, которые составили от 6 до 28 %. Это означает, что гибкие анкера догружаются от действия горизонтальных нагрузок. В отечественной нормативной документации данный факт не учитывается несмотря на то, что дополнительная нагрузка может привести к превышению предела несущей способности.

В результате определения несущей способности по СП, согласно расчетам по формуле (9.5), несущая способность болта составила 52,15 кН. При расчете по Еврокоду, согласно п. 6.6.3, несущая способность устанавливается по меньшему из двух предельных состояний. Определяется несущая способность по металлу анкера и по бетону, в результате вычислений было получено значение равное 27,46 кН, определенное по предельному состоянию бетона.

Дальнейшее изучение материала по вопросу установления несущей способности анкеров разных производителей позволило сделать вывод, что каждый производитель создал свой стандарт, основываясь на Еврокоде. Следует отметить, что приведенные в стандартах организаций значения несущей способности определены, основываясь на Еврокоде, поэтому предел прочности варьируется около 30–40 кН в зависимости от конструкции и материала анкера.

Фактическая несущая способность определяется перемножением табличного значения на понижающий коэффициент работы, варьируемый в зависимости от высоты профилированного настила и самого анкера от 0,5 до 1. Таким образом, ориентируясь на рекомендации производителя, был подобран анкер X-HVB 125 и определена его несущая способность в рассматриваемом перекрытии, которая составила 11 кН, что на 79 % меньше значения, полученного по СП, и на 60 % меньше, чем по Еврокоду.

Из полученных по различным нормативным документам несущим способностям выберем наибольшее значение, допуская, что гибкий анкер может выдержать усилия равные 52,15 кН. Тогда усилия, приходящиеся на один болт, составляют от 105 до 136 % несущей способности. Отдельно подчеркнем, что при рассмотрении усилий от температурного воздействия, они уже превышают несущую способность в 4,7–6 раз. То есть одного температурного воздействия достаточно для разрушения конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В заключение вышесказанного отметим важность исследования влияния горизонтальных нагрузок на работу гибких анкеров. На примере реально существующего здания определены усилия в стад-болтах от действия ветровой нагрузки и температурного воздействия. В результате установлено, что возникают дополнительные усилия от горизонтальных воздействий, составляющие от 6 до 28 % усилий от вертикальных нагрузок.

При дальнейшем изучении вопроса выявлено наличие большого количества норм организаций — производителей анкеров, которые базируются на расчетах по Еврокоду с поправкой на конструкцию самого анкера. Отечественная нормативная база рассматривает усилия от сдвига, однако, приведенные формулы не раскрывают характера работы соединений. За рубежом данный вопрос исследован довольно подробно, поэтому при определении несущей способности на сдвиг в Еврокоде имеется ряд уточнений, касающихся места расположения болта, вида профиля, конструкции анкера и т.д.

Полученные значения несущей способности разнились от 2 до 5 раз в зависимости от выбранного нормативного документа для расчета. Приняв, что анкер может выдержать наибольшую нагрузку, было определено, что усилия от совместного действия вертикальных и горизонтальных усилий превышает несущую способность на 5–36 %.

Наиболее спорным моментом исследования стала оценка доли усилий от температурного воздействия, так как значения несущей способности

на порядок ниже, чем возникающие в стад-болтах усилия. Согласно полученным усилиям, анкера должны были разрушиться, однако, результаты рассмотренных в связи с этим наблюдением статей позволили сделать вывод, что в анкерах возможно развитие пластичности, выход из строя части анкеров, но конструкция в целом будет иметь достаточную прочность и жесткость. Кроме того, в рамках данного исследования задачи решались в упругой постановке, а само значение температурного перепада было принято по максимальным значениям. Несмотря на выдвинутые предположения данный вопрос требует более точного изучения и проработки.

В заключении приведем выводы, сделанные в результате изучения доли влияния горизонтальных нагрузок на стад-болты:

1. От отдельного действия горизонтальных нагрузок возникают усилия равные 6–28 % усилий от вертикальных нагрузок, что нельзя игнорировать при расчетах каркасов зданий, так как совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок дает нагрузку, превышающую несущую способность до 36 %.

2. Исследование нормативной литературы, а также норм организаций — производителей стад-болтов показало отсутствие единого метода расчета на действие сдвигающих усилий.

3. Необходимы дальнейшие исследования данного вопроса, так как полученные от температурных воздействий усилия превышали несущую способность болта, что не отражает действительную работу диска перекрытия в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siva A., Sangeetha S. A state of art — review of composite deck systems // International Conference on Recent Developments in Civil and Environmental Engineering. 2016.
2. Siva A., Thamilselvi P., Saddam M.A., Senthil R. Concrete composite slab construction: state of the art // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2017. Vol. 06. Issue 01. Pp. 120–128. DOI: 10.15623/ijret.2017.0601023
3. Koliou M., Filiatrault A., Kelly D.J., Lawson J. Buildings with rigid walls and flexible roof diaphragms. I: evaluation of current U.S. seismic provisions // Journal of Structural Engineering. 2016. Issue 3. No. 142. P. 04015166. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001438
4. Shim H.B., Lee J.H. Shear force of headed shear studs, high-strength shear studs and steel plate embedded in concrete: An experimental study // Material Research Innovations. 2015. Vol. 19. Issue sup8. Pp. S8-145–S8-148. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001645
5. Wang Y.-H., Yu J., Liu J.-P., Chen Y.F. Shear behavior of shear stud groups in precast concrete decks // Engineering Structures. 2019. Vol. 187. Pp. 73–84. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.002
6. Molkens T., Dobrić J., Rossi B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors // Engineering Structures. 2019. Vol. 197. P. 109412. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109412
7. Ding F.-X., Yin Guo-An, Wang H.-B., Wang L., Guo Q. Behavior of headed shear stud connectors subjected to cyclic loading // Steel and Composite Structures. 2017. Vol. 25. Issue 6. Pp. 705–716. DOI: 10.12989/scs.2017.25.6.705
8. Luttrell L., Mattingly J., Schult W., Spoto T. Diaphragm design manual. 4th ed. Steel Deck Institute, 2015. 405 p.
9. Туснин А.П. Перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 10–14.
10. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Рациональное распределение жесткости плит по высоте здания с учетом работы перекрытия на сдвиг // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 84–90. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.11.84-90
11. Ling Y., Zheng Z., Yang T.Y., Ma H. Behaviour and modeling of the bearing capacity of shear stud connectors // International Journal of Steel Structures. 2019. Vol. 19. Issue 2. Pp. 650–659. DOI: 10.1007/s13296-018-0154-3
12. O'Brien P., Eatherton M.R., Easterling W.S. Characterizing the load-deformation behavior of steel deck diaphragms using past test data. 2017. Pp. 243–251. URL: <http://hdl.handle.net/10919/78679>
13. Михаськин В.В., Карачева М.А. Моделирование сталежелезобетонного перекрытия с профилированным настилом и оценка расчетной схемы в сравнении с ручным расчетом // Вопросы науки и образования. 2018. № 7 (19). С. 56–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-stalezhelezobetonogo-perekrytiya-s-profilirovannym-nastilom-i-otsenka-raschetnoy-shemy-v-sravnenii-s-ruchnym-raschetom>
14. Будюшкина К.А., Кузнецов В.С., Мурлышева Ю.А., Улямаев А.С., Шапошникова Ю.А. Анализ работы комбинированных балок в широком диапазоне нагрузок // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 169.

15. Айрумян Э.Л., Каменников Н.И., Румянцев И.А. Особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных перекрытий по профилированному стальному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 21–26.

16. Замалиев Ф.С. К расчету сталежелезобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3 (37). С. 129–134. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/3_2016/129_134_Zamaliyev.pdf

17. Джонсон Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: Проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1 (пер. с англ.). М.: МГСУ, 2012. 413 с.

18. Замалиев Ф.С. К оценке прочности анкерных связей изгибаемых сталежелезобетонных конструкций // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (31). С. 80–85.

19. Dujmović D., Androić B., Lukačević I. Composite Structures according to Eurocode 4. Wilhelm Ernst & Sohn, A Wiley Company, 2015. Pp. 908–926. DOI: 10.1002/9783433604908

20. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 51–65. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.8.51-65

Поступила в редакцию 2 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 7 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 27 декабря 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: **Алсу Илсуровна Фаттахова** — аспирант, ассистент кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1058460; Fattakhova.Alsou@yandex.ru.

REFERENCES

1. Siva A., Sangeetha S. A state of art — review of composite deck systems. *International Conference on Recent Developments in Civil and Environmental Engineering*. 2016.

2. Siva A., Thamilselvi P., Saddam M.A., Sen-thil R. Concrete composite slab construction: state of the art. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2017; 06(01):120-128. DOI: 10.15623/ijret.2017.0601023

3. Koliou M., Filiatrault A., Kelly D.J., Lawson J. Buildings with rigid walls and flexible roof diaphragms. I: Evaluation of current U.S. seismic provisions. *Journal of Structural Engineering*. 2016; 142(3):04015166. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001438

4. Shim H.B., Lee J.H. Shear force of headed shear studs, high-strength shear studs and steel plate embedded in concrete: An experimental study. *Material Research Innovations*. 2015; 19(sup8):S8-145-S8-148. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001645

5. Wang Y.-H., Yu J., Liu J.-P., Chen Y.F. Shear behavior of shear stud groups in precast concrete decks. *Engineering Structures*. 2019; 187:73-84. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.002

6. Molkens T., Dobrić J., Rossi B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors. *Engineering Structures*. 2019; 197:109412. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109412

7. Ding F.-X., Yin Guo-An, Wang H.-B., Wang L., Guo Q. Behavior of headed shear stud connectors subjected to cyclic loading. *Steel and Composite Structures*. 2017; 25(6):705-716. DOI: 10.12989/scs.2017.25.6.705

8. Luttrell L., Mattingly J., Schultz W., Sputo T. *Diaphragm design manual*. 4th ed. Steel Deck Institute, 2015; 405.

9. Tusnin A.R. Floors of Multi-Storey Buildings with Steel Frames. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 8:10-14. (rus.).

10. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Rational distribution of slab stiffness along the height of building with account for shear deformation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 11:84-90. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.11.84-90 (rus.).

11. Ling Y., Zheng Z., Yang T.Y., Ma H. Behaviour and modeling of the bearing capacity of shear stud connectors. *International Journal of Steel Structures*. 2019; 19(2):650-659. DOI: 10.1007/s13296-018-0154-3

12. O'Brien P., Eatherton M.R., Easterling W.S. *Characterizing the load-deformation behavior of steel deck diaphragms using past test data*. 2017; 243-251. URL: <http://hdl.handle.net/10919/78679>

13. Mihas'kin V.V., Karacheva M.A. Modeling of steel-reinforced concrete flooring with profiled flooring and evaluation of the design scheme in comparison

with manual calculation. *Science and Education*. 2018; 7(19):56-58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-stalezhelezobetonного-perekrytiya-s-profilirovannym-nastilom-i-otsenka-raschetnoy-shemy-v-sravnenii-s-ruchnym-raschetom> (rus.).

14. Budoshkina K.A., Kuznetsov V.S., Murlysheva Yu.A., Ulyamaev A.S., Shaposhnikova Yu.A. Analysis of the operation of combined beams in a wide range of loads. *Engineering Journal of the Don*. 2018; 2(49):169. (rus.).

15. Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I., Rumyantseva I.A. Features of design of monolithic slabs for steel concrete ceiling on profiled steel decking. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:21-26. (rus.).

16. Zamaliev F.S. To the calculation of steel-reinforced concrete floors with profiled steel flooring. *News of the KSUAE*. 2016; 3(37):129-134. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/3_2016/129_134_Zamaliev.pdf (rus.).

17. Jonson R.P. *Designer's guide to Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1 (transl. from engl.)*. Moscow, MGSU, 2013; 412. (rus.).

18. Zamaliev F.S. By assessing the strength of anchor ties bent steel-concrete structures Resume. *News of the KSUAE*. 2015; 1(31):80-85. (rus.).

19. Dujmović D., Androić B., Lukačević I. *Composite Structures according to Eurocode 4*. Wilhelm Ernst & Sohn, A Wiley Company, 2015; 908-926. DOI: 10.1002/9783433604908

20. Almazov V.O., Harutyunyan S.N. Design of Composite Reinforced Concrete Slabs according to Eurocode 4 and Russian Recommendations. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 8:51-65. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.8.51-65 (rus.).

Received November 2, 2019.

Adopted in a revised form on December 7, 2019.

Approved for publication December 27, 2019.

B I O N O T E S: **Alsou I. Fattakhova** — post-graduate student, assistant of the Department of Metal Constructions and Structures Test; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 1058460; Fattakhova.Alsou@yandex.ru.

Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации

Т.А. Бахтина, Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, В.В. Николаенко

Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»); г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения проблемы роста концентрации парниковых газов в атмосфере, приводящей к глобальным экологическим проблемам, в области производства строительных материалов ведутся поиски способов снижения эмиссии CO_2 . Доломитовая известь характеризуется пониженной температурой обжига, снижением выбросов CO_2 и дальнейшим связыванием выделившегося углекислого газа в нерастворимые соединения, обуславливающие получение материала на его основе с высокими механическими характеристиками.

Материалы и методы. Обжиг доломитовой породы фракцией 5–10 мм осуществляли в лабораторной камерной печи, а обожженный продукт измельчали до прохождения сквозь сито с ячейкой 1,25 мм и затворяли водой. Из полученной после гидратации доломитовой извести методом прессования изготавливали опытные образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм и подвергали их принудительной карбонизации в специальной камере при определенной концентрации CO_2 и времени выдержки в камере.

Результаты. Определены физико-механические характеристики опытных карбонизированных образцов (прочность при сжатии от 2 до 36 МПа, при средней плотности 1500–1800 кг/м³), твердевших в среде повышенной концентрации углекислого газа. Выполнена апробация полученных в лабораторных условиях результатов в промышленных условиях на действующем предприятии путем прессования партии одинарного кирпича, последующего его карбонатного твердения в опытно-промышленной камере принудительной карбонизации и определения основных нормируемых свойств.

Выводы. Низкообжиговая доломитовая известь карбонатного твердения позволяет снизить эмиссию углекислого газа при производстве за счет снижения температуры обжига с последующим использованием выделившегося CO_2 для осуществления карбонатного твердения изделий на его основе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: доломиты, доломитовая известь, углекислый газ, принудительная карбонизация

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке внутривузовского гранта Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского в рамках научного проекта № ВГ 01/2018.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко В.В. Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 43–57. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.43-57

Obtaining construction materials based on the dolomite lime of accelerated forced-carbonization hardening

Tamara A. Bakhtina, Nikolay V. Lyubomirskiy, Aleksandr S. Bakhtin, Vitaliy V. Nikolaenko

Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "V.I. Vernadsky Crimean Federal University" (ACA Vernadsky CFU); Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of increasing the concentration of greenhouse gases in the atmosphere leading to global environmental problems, searches of ways to reduce carbon dioxide emissions are conducted in the field of construction material production. lower burning temperature, lower carbon dioxide emissions, and further binding of the exuding carbon dioxide to insoluble compounds, which determine the obtainment of a dolomite lime-based material with high mechanical properties are characteristic of dolomite lime.

Materials and methods. Dolomite rock with a fraction of 5 mm to 10 mm was burned in a laboratory chamber furnace, while the calcined product was ground to pass through a 1.25 mm mesh sieve and tempered with water. The dolomite lime obtained

after hydration was pressed into cylinder samples with a diameter and a height of 30 mm. The samples were subjected to forced carbonization in a particular chamber at a certain carbon dioxide concentration and for a certain chamber holding time.

Results. The physicomechanical characteristics of the experimental carbonized samples were determined (compressive strength of 2 to 36 MPa with an average density of 1500 to 1800 kg/m³). The samples got hard under conditions of an increased carbon dioxide concentration. The results obtained under laboratory conditions were tested under industrial conditions at a functioning enterprise by pressing a single brick batch, its subsequent carbonate hardening in a pilot industrial chamber for forced carbonization, and determination of the main standardized properties.

Conclusions. The low-burned carbonate-hardened dolomite lime allows reducing carbon dioxide emission during production by means of lowering the burning temperature with the subsequent use of the exuding carbon dioxide for the implementation of carbonate hardening of dolomite lime-based products.

KEYWORDS: dolomites, dolomite lime, carbon dioxide, forced carbonization

Acknowledgement. The studies were carried out with funding from a grant of V.I. Vernadsky Crimean Federal University in the scope of the scientific project VG 01/2018.

FOR CITATION: Bakhtina T.A., Lyubomirskiy N.V., Bakhtin A.S., Nikolaenko V.V. Obtaining construction materials based on the dolomite lime of accelerated forced-carbonization hardening. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):43-57. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.43-57 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные экологические проблемы, связанные с изменением климата, в результате деятельности человека, прочно вошли в разряд наиболее обсуждаемых на международном уровне вопросов. Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере, приводящее к негативным последствиям, привело к необходимости разработки новых продуктов и методов производства, характеризующихся более низкими выбросами CO₂, чем традиционные подходы [1–3]. В области строительных материалов одним из наиболее энергоемких процессов является производство портландцемента, на долю которого приходится от 5 до 10 % антропогенных выбросов CO₂ во всем мире [4–6]. Для их сокращения рассматриваются несколько направлений, которые включают сокращение потребления энергии при производстве портландцемента, замену портландцементного клинкера отходами [7] или промышленными побочными продуктами и разработкой альтернативных связующих веществ [8–10]. Кроме этого, в качестве путей сокращения выбросов углекислого газа предлагаются повышение экономичности производства (снижение температуры обжига для образования клинкера, оптимизация фазового состава), предпочтение клинкерных минералов, синтезируемых с пониженным образованием CO₂, а также замена гидратации вяжущих веществ на карбонизацию [11]. К альтернативным низкоуглеродистым связующим относят сульфоалюминатный цемент, щелочевывороченное вяжущее [12] и реакционноспособный цемент на основе оксида магния [13, 14]. Реактивный магнезиальный цемент (РМЦ) был разработан

более десяти лет назад, и представляет интерес благодаря более низкой температуре производства (750 °С в отличие от 1450 °С для портландцемента), а также способности набирать прочность в результате реакции карбонизации [15, 16]. Главным компонентом РМЦ является реактивный оксид магния MgO, который получают путем обжига магнезита (порода, состоящая из 90 % MgCO₃, 7 % SiO₂ и 3 % CaCO₃) в печи при 750 °С [17]. Твердение реактивного магнезиального цемента происходит в два этапа: 1 — гидратация MgO с образованием брусита Mg(OH)₂ и 2 — реакция брусита с CO₂ с образованием ряда гидратированных карбонатов магния. Так, в смесях на основе реактивного магнезиального цемента, по данным исследователей [18–20], были обнаружены такие виды гидратированных карбонатов магния, как несквегонит (MgCO₃ · 3H₂O), гидромагнезит (4MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 4H₂O), дипингит (4MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 5H₂O) и артинит (MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 3H₂O). Также авторы указывали, что процесс карбонизации бетонных смесей на основе РМЦ состоит из диффузии CO₂ в насыщенную сетку пор, проникновения и растворения CO₂ в системе пор, образовании углекислоты H₂CO₃ в растворе пор, ионизации углекислоты и появлении H⁺ и CO₃²⁻, выщелачивании Mg²⁺ из-за растворения кристаллов Mg(OH)₂ и образовании гидратированных карбонатов магния посредством реакции между Mg²⁺ и CO₃²⁻. Исследованиями [21–23] было установлено, что бетоны, содержащие MgO после карбонизации, характеризуются снижением пористости и повышением прочности при сжатии по сравнению с бетонами, не подвергавшимися обработке угле-

кислым газом. Однако в работе [24] представлены результаты исследований, из которых следует, что, хотя реактивная магнезия и прокаливается при гораздо более низкой температуре, чем портландцементный клинкер, выброс углерода, вызванный разложением магнезита, несколько больше, чем при разложении кальцита, и выброс углерода из топлива (FDCO_2) при производстве магнезиального цемента выше, чем у портландцемента. Термодинамический анализ показал, что существуют трудности в поглощении магнезиальными цементами углекислого газа с образованием гидромагнезита, артинита, лансфордита или несквегонита так, как карбонизация брусита является особенно сложной, ввиду тенденции Mg образовывать метастабильные гидрокарбонаты, свободная энергия образования которых зависит от парциального давления CO_2 .

Таким образом, изучение карбонизации систем, содержащих помимо гидроксида кальция, гидроксид магния позволит разработать научно-технологические основы ускоренного получения строительных материалов принудительного карбонатного твердения из отходов добычи и переработки доломитовых горных пород, создающих принципы направленного формирования структуры и свойств на основе принудительно карбонизированных CaO –, MgO – содержащих систем, «зеленых» технологий их производства и секвестрации CO_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья для научных исследований использовали доломитовые породы, добываемые для производства щебня в карьере «Каменные Борницы» на территории Ленинградской области фракцией до 10 мм. Химический анализ исходного доломитового сырья определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на ЭДСпектрметре Epsilon 3XLE (PANalytical). Результаты анализа представлены в табл. 1.

Минералогический состав исходного доломитового сырья определяли с помощью высокотемпературного синхронного анализатора STA 8000 (Perkin Elmer) в интервале температур 30–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин, в среде

азота (см. рис. 1). Минералогический состав исходной доломитовой породы, рассчитанный по результатам термического анализа, представлен в табл. 2.

Данные термического анализа согласуются с результатами рентгенофлуоресцентного анализа в части определения оксидов кальция и магния, которые в основном и определяют вяжущие свойства данного вида сырья, при организации его твердения в среде с повышенной концентрацией углекислого газа. На представленной термограмме (см. рис. 1) присутствуют два ярко выраженных эндотермических эффекта с экстремумами при температурах 827 и 880 °C, которые соответствуют разложению карбонатов магния и кальция соответственно. Необходимо отметить, что согласно данным термического анализа полное разложение карбоната магния завершается при температуре 850 °C, а карбоната кальция — при 970 °C.

Обжиг доломитовой породы осуществляли в лабораторной камерной печи Nabertherm LH 30/13 при определенной температуре с изотермической выдержкой при заданной температуре в течение 45 мин. Для обжига использовали фракцию доломита 5–10 мм. Обожженный продукт измельчали до прохождения сквозь сито с ячейкой 1,25 мм и затворяли (гасили) водой в соотношении 1:1. После гашения полученный продукт высушивали в сушильном шкафу при температуре 80 °C до постоянной массы. На основе полученных таким образом образцов гашеной доломитовой извести изготавливали опытные образцы для изучения формирования структуры и свойств данного вяжущего принудительного карбонатного твердения.

Опытные образцы из доломитовой извести изготавливали в виде цилиндров диаметром и высотой 30 мм методом полусухого двухстороннего прессования в металлической форме при удельном давлении прессования 30 МПа. Водосодержание вяжущего при этом варьировалось от 10 до 20 % масс. Значения удельного давления прессования и водосодержания формовочных смесей приняты на основании результатов исследований, проведенных авторами настоящей статьи ранее [25–27], которые позволили установить определяющее влияние указанных факторов на эффективность протекания

Табл. 1. Химический состав исходной доломитовой породы

Table 1. Chemical composition of initial dolomite rock

Наименование / Denomination	Содержание, % / Content, %									
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂	Всего, % / Total, %
Доломитовая порода / Dolomite rock	25,77	20,57	10,62	2,88	0,75	0,03	0,87	0,11	38,3	99,9

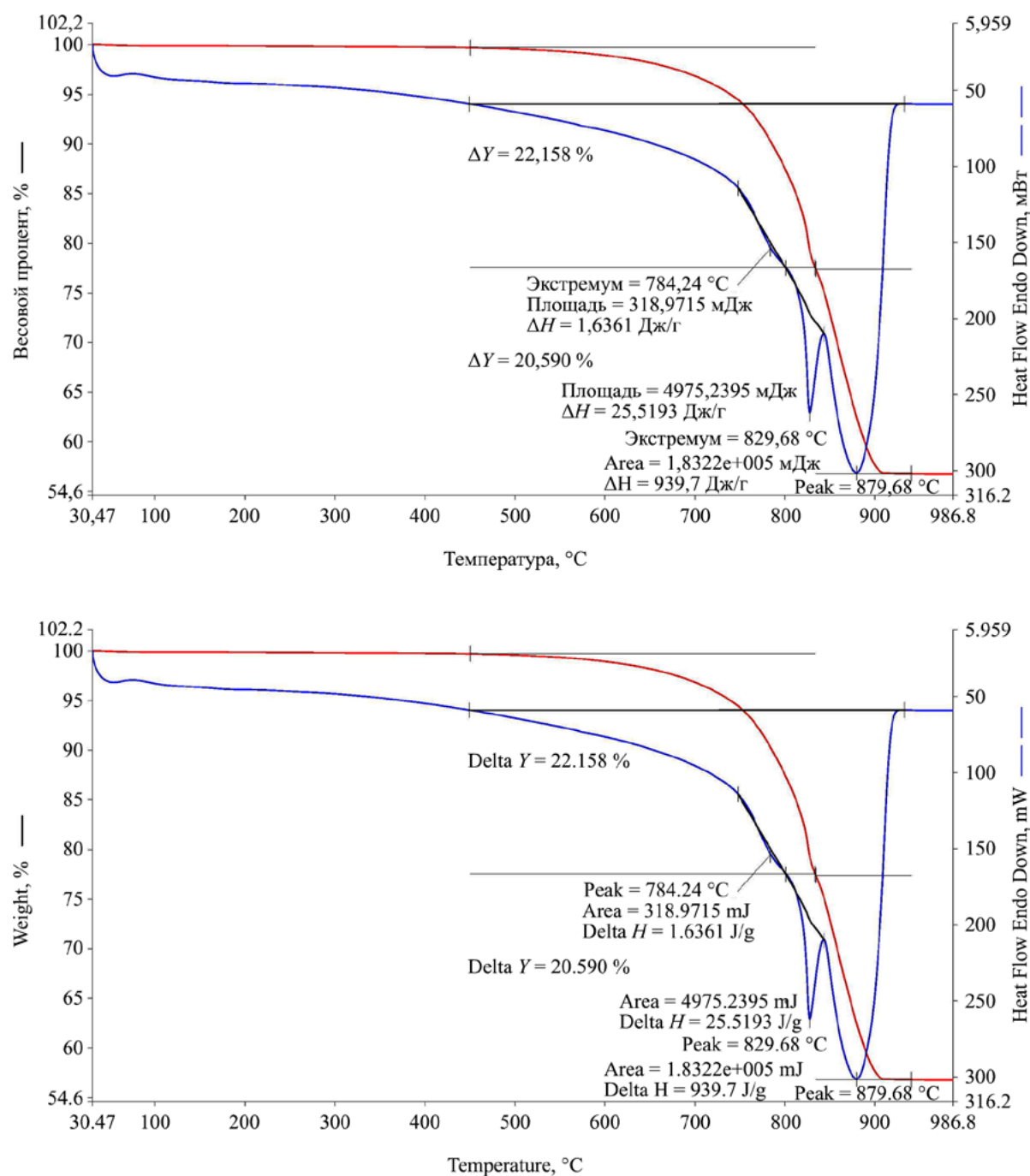


Рис. 1. Термограмма исходной доломитовой породы

Fig. 1. Thermogram of the initial dolomite rock

Табл. 2. Минералогический состав исходной доломитовой породы

Table 2. Mineralogical composition of initial dolomite rock

Потери в интервале температур 450–840 °C, % / Loss in the temperature range of 450 to 840 °C, %	Содержание MgCO ₃ /MgO, % / MgCO ₃ /MgO content, %	Потери в интервале температур 840–1000 °C, % / Loss in the temperature range of 840 to 1000 °C, %	Содержание CaCO ₃ /CaO, % / CaCO ₃ /CaO content, %	Примеси, % / Impurities, %
22,2	42,5/20,3	20,5	46,8/26,2	до 10,0

процесса принудительной карбонизации. Принудительную карбонизацию опытных образцов-цилиндров осуществляли в специальной камере без избыточного давления и повышения температуры. Концентрация углекислого газа в камере карбонизации поддерживалась в диапазоне 30–35 %, что соответствует средней концентрации CO_2 в отходящих газах аппаратов по обжигу карбонатного и доломитового сырья, а также тепловых установок ТЭС. Время карбонизации составляло 90 мин. По истечении времени карбонизации образцы высушивались до постоянной массы, а затем подвергались испытаниям.

Изменение фазового состава опытных образцов изучали методом дифференциально-термического (ДТА) и термогравиметрического (ТГА) анализов на высокотемпературном синхронном анализаторе STA 8000 (Perkin Elmer) в интервале температур 30–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин в среде азота. Исследования микроструктуры опытных образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе серии EVO MA (Carl Zeiss). Испытание опытных образцов на среднюю плотность, водопоглощение по массе, прочность на сжатие и на растяжение при изгибе осуществляли по стандартным методикам с использованием автоматической системы испытаний, на базе консоли управления MCC8 (Controls).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты изменения фазового состава обожженного продукта после его гидратации, рассчитанные по данным термического анализа, представлены в табл. 3. Примеси в виде инертных оксидов, показанные в табл. 1, не учитывались.

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать вывод, что в полученных образцах доломитовой извести количество активного оксида магния возрастает при увеличении температуры обжига доломитовой породы до 850 °C и далее его количество заметно снижается в связи с процессом спекания и укрупнения частиц MgO . Пережженные частицы периклаза не вступают во взаимодействие с водой, что подтверждается снижением количества Mg(OH)_2 , рассчитанным по кривой зависимости изменения массы от температуры. Количество CaO в исследуемом интервале температур закономерно возрастает и составляет при 1000 °C 23,3 %. Согласно полученным опытным данным максимальное содержание активных оксидов CaO и MgO составило 40,8 % для продукта полученного при температуре обжига доломита 850 °C. Так как основная цель данной работы заключалась в исследовании возможности получения строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации и получения соот-

Табл. 3. Изменение фазового состава продукта обжига доломита после его гидратации в зависимости от температуры обжига

Table 3. Change in phase composition of dolomite burning product after its hydration depending on the calcination temperature

Температура обжига, °C / Calcination temperature, °C	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 360–490 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 360 to 490 °C, %	Содержание $\text{Mg(OH)}_2/\text{MgO}$, % / $\text{Mg(OH)}_2/\text{MgO}$ content, %	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 490–550 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 490 to 550 °C, %	Содержание $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$, % / $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ content, %	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 550–960 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 550 to 960 °C, %	Содержание $\text{MgCO}_3/\text{CaCO}_3$, % / $\text{MgCO}_3/\text{CaCO}_3$ content, %
700	2,55	8,3/5,7	–	–/–	35,1	30,6/46,8
750	4,54	14,7/10,2	0,42	1,7/1,3	29,7	21,2/44,5
800	6,71	21,7/15,0	1,0	4,1/3,1	23,1	11,1/41,3
850	8,48	27,5/19,0	7,0	28,8/21,8	5,9	2,8/7,9
900	4,1	13,3/9,2	7,2	29,6/22,4	3,0	–/6,8
1000	2,69	8,7/6,0	7,5	30,8/23,3	2,3	–/5,2

ветственно строительных изделий карбонатного твердения с высокими механическими характеристиками, то дальнейшие исследования проводили с доломитовой известью, обожженной при температурах до 850 °С. Из полученной при исследуемых температурах доломитовой извести после ее гидратации изготавливали опытные образцы-цилиндры, которые подвергали процессу принудительной карбонизации и определяли их физико-механические свойства. Принудительную карбонизацию проводили без избыточного давления и повышенной температуры в камере карбонизации. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 позволяет сделать вывод об эффективности протекания процесса карбонатного твердения исследуемых систем, результатом чего является существенное увеличение значений прочности на сжатие и средней плотности опытных образцов. Следует отметить, что водосодержание сырьевой смеси также оказывает влияние на исследуемые характеристики опытных образцов и существует оптимальное его значение для достижения максимальной степени карбонизации, которая выражается увеличением физико-механических

характеристик образцов. Доломитовая известь, полученная при температурах до 750 °С и подверженная гидратации, в основном представлена бруситом ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) в количестве до 14,7 % и неразложившимся остатком карбоната магния и кальция. Увеличение прочности и плотности для этих систем после их карбонизации несущественно в сравнении с вяжущими, полученными при температурах от 750 до 850 °С. Данный факт говорит о том, что в ускоренном синтезе прочности в процессе принудительной карбонизации существенное влияние оказывает наличие в вяжущем портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который появляется при увеличении температуры обжига свыше 750 °С. Детальное изучение данных таблицы позволяет сделать вывод, что брусит не вступает в активное взаимодействие с углекислым газом при обычных условиях, а портландит напротив, появляясь в системе с увеличением температуры обжига доломита, приводит к существенному увеличению показателей прочности и плотности за счет связывания CO_2 и перехода в кальцит. Данный вывод подтверждается термическим анализом сырьевой смеси доломитовой извести, полученной при температуре обжига 820 °С, до карбонизации и после

Табл. 4. Физико-механические характеристики опытных образцов в зависимости от условий получения

Table 4. Physicomechanical characteristics of test samples depending on obtaining conditions

№ п/п / Item number	Температура обжига доломита, °C / Dolomite calcination temperature, °C	Условия получения образцов-цилиндров / Cylinder sample obtaining conditions		Свойства опытных образцов до карбонизации / Properties of experimental samples before carbonization		Свойства опытных образцов после карбонизации / Properties of experimental samples after carbonization		
		Давление прессования $p_{\text{пр}}$, МПа / Pressing pressure $p_{\text{пр}}$, MPa	Водосодержание сырьевой смеси W , % / Raw mixture water content W , %	Прочность при сжатии, МПа / Compression strength, MPa	Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	Прочность при сжатии, МПа / Compression strength, MPa	Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	Увеличение прочности, % / Strength increase, %
1	700	30,0	10	4,7	1791	5,0	1795	7,1
2			15	3,3	1792	3,7	1806	51,0
3			20	2,1	1785	2,2	1792	4,8
4	750		10	6,3	1624	7,0	1656	11,1
5			15	7,9	1648	9,9	1673	25,3
6			20	8,7	1663	9,1	1682	4,6
7	800		10	11,5	1526	27,2	1638	136,5
8			15	14,1	1553	34,7	1659	146,1
9			20	14,7	1566	33,7	1656	129,3
10	850		10	16,5	1339	33,0	1501	100,0
11			15	14,7	1379	35,8	1540	143,5
12			20	12,7	1399	29,0	1537	128,3

нее (рис. 2 и 3). Поскольку при диссоциации MgCO_3 количество выделяющегося CO_2 на 19 % больше в сравнении с диссоциацией CaCO_3 , необходимо определить температуру обжига доломита, которая бы обеспечивала оптимальный фазовый состав вяжущего вещества и получение высоких механических характеристик карбонизированного материала на основе этой смеси, при минимальном количестве выделившегося углекислого газа. Для исследуемой доломитовой породы эта температура находится в пределах 800–850 °С и соответствует экстремуму диссоциации карбоната магния, а именно 820 °С.

Полученное при 820 °С вяжущее после гидратации (см. рис. 2) имеет три ярко выраженных эндотермических эффекта: первый с максимумом при 406 °С соответствует дегидратации $\text{Mg}(\text{OH})_2$, второй при 471 °С — дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, третий при 826 °С — диссоциации карбоната кальция и незначительного остатка карбоната магния. Минералогический состав полученной доломитовой извести, рассчитанный по результатам термического анализа представлен в табл. 5. Незначительный эндоэффект при 178 °С с потерей массы в 1,84 % соответствует удалению адсорбционной воды.

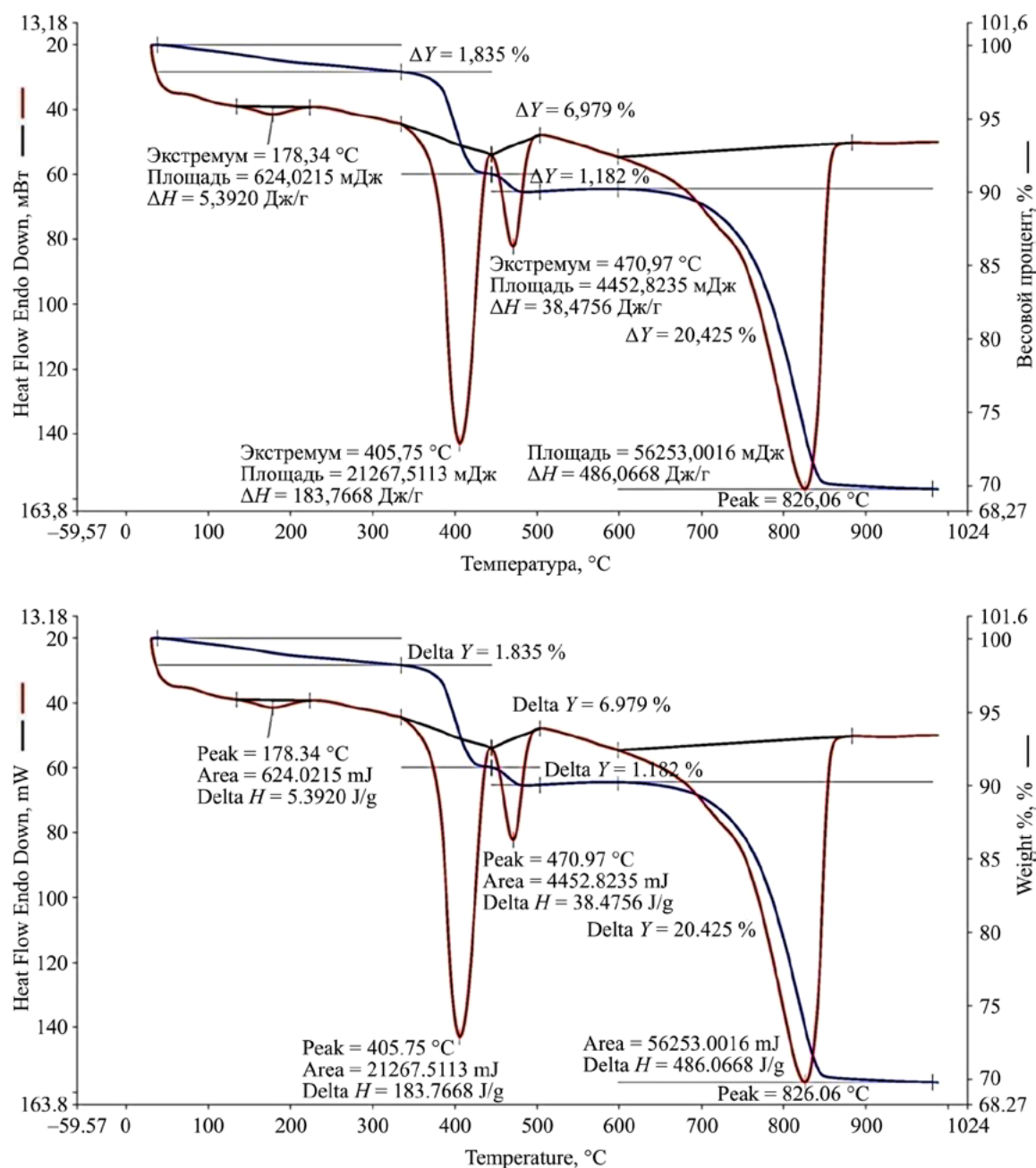


Рис. 2. Термограмма доломитовой извести, полученной при 820 °С после ее гидратации и сушки

Fig. 2. Thermogram of dolomite lime obtained at 820 °С after its hydration and drying

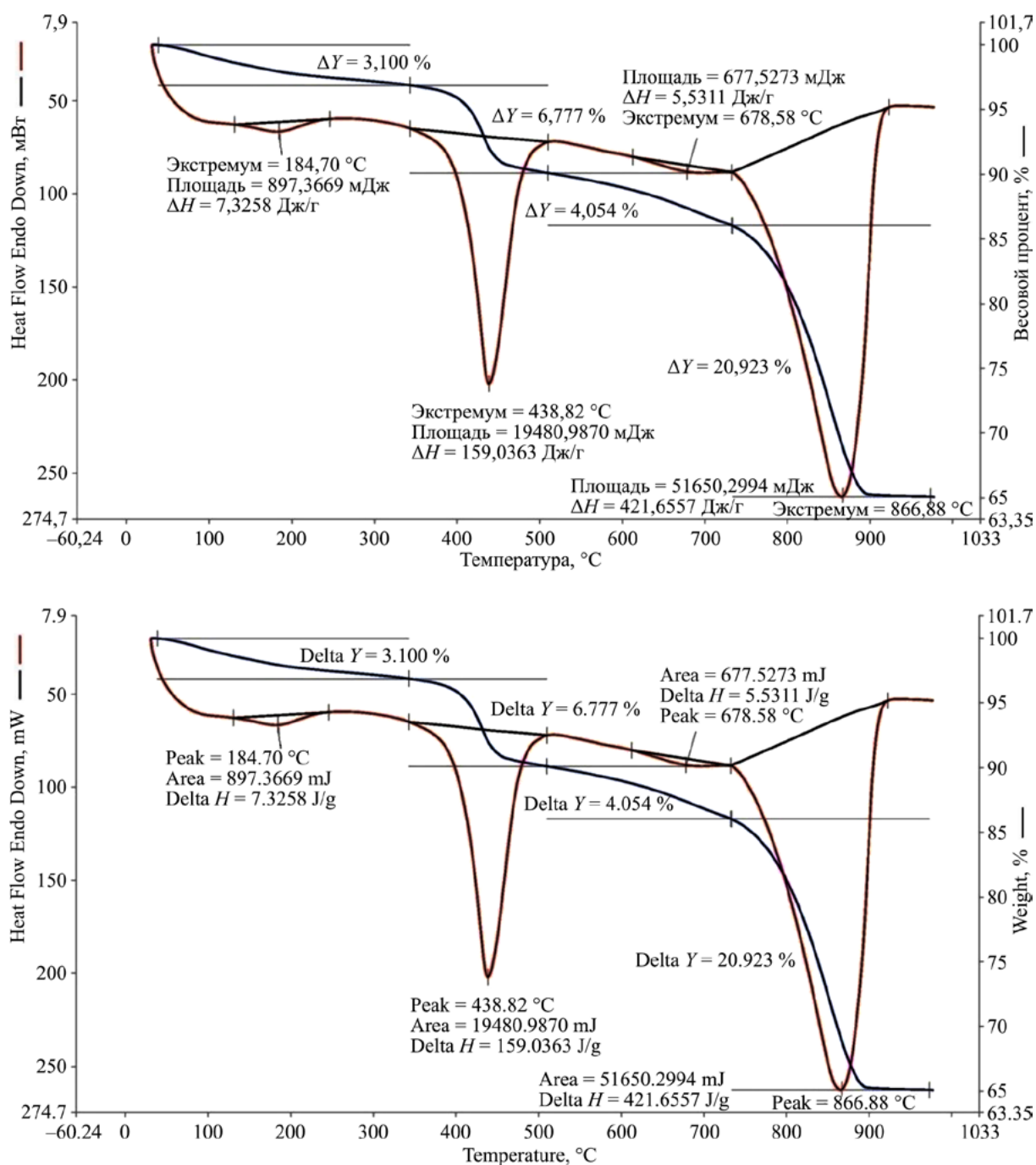


Рис. 3. Термограмма доломитовой извести, полученной при 820 °C после ее гидратации, сушки и последующей карбонизации при водосодержании смеси 20 %

Fig. 3. Thermogram of dolomite lime obtained at 820 °C after its hydration, drying, and subsequent carbonization with the mixture water content of 20 %

Термограмма, представленная на рис. 3, характеризуется наличием двух ярко выраженных эндотермических эффектов. Первый при температуре 439 °C соответствует разложению не вступившего в реакцию карбонизации $Mg(OH)_2$, второй при 867 °C — $CaCO_3$. Сравнивая результаты термического анализа до и после карбонизации (рис. 2, 3) можно сделать вывод, что гидроксид магния прак-

тически не вступает в реакцию карбонизации. Следует отметить, что потеря массы в диапазоне температур 370–520 °C характеризующих дегидратацию $Mg(OH)_2$ снижается после карбонизации на 0,2 %, что соответствует снижению гидроксида магния всего на 0,7 %. При этом после карбонизации на рис. 3 появляется незначительный растянутый эндотермический эффект с потерей массы в интервале темпе-

Табл. 5. Минералогический состав доломитовой извести, полученной при 820 °С

Table 5. Mineralogical composition of dolomite lime obtained at 820 °C

Температура обжига, °С / Calcination temperature, °С	820
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 360–490 °С, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 360 to 490 °С, %	6,98
Содержание $Mg(OH)_2/MgO$, % / $Mg(OH)_2/MgO$ content, %	22,7/15,6
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 490–550 °С, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 490 to 550 °С, %	1,2
Содержание $Ca(OH)_2/CaO$, % / $Ca(OH)_2/CaO$ content, %	4,9/3,7
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 550–960 °С, % / Mass loss the in endothermic effect temperature range of 550 to 960 °С, %	20,4
Содержание $MgCO_3/CaCO_3$, % / $MgCO_3/CaCO_3$ content, %	9,9/40,2

ратур 630–740 °С равной 4,1 % и характеризующий предположительно диссоциацию образовавшегося $MgCO_3$. Присутствие портландита в системе после карбонизации не выявлено, что говорит о полном его переходе в $CaCO_3$. Результатом данных химических преобразований в структуре материала после его карбонизации является увеличение значений прочности при сжатии с 12,2 до 31,7 МПа и средней плотности с 1550 до 1650 кг/м³.

Таким образом, после карбонизации образцов в течение 90 мин весь портландит, находящийся в системе в результате взаимодействия с углекислым газом, перешел в карбонат кальция. Анализируя количество гидроксида магния, вступившего в реакцию с CO_2 , можно сделать вывод, что при нормальных условиях протекания данной реакции брусит вступает в химическое взаимодействие с CO_2 в крайне малых количествах. По-видимому, это связано с очень низкой растворимостью гидроксида магния в воде (0,0012 г/100 мл) в сравнении с растворимостью гидроксида кальция (0,19 г/100 мл). На рис. 4 представлены фото микроструктуры карбонизированного материала опытных образцов на основе доломитовой извести.

Структура карбонизированного материала представлена пластинчатыми кристаллами $Mg(OH)_2$, расположенными на подложке из ромбоэдрических кристаллов кальцита и доломита. Размеры в продольном и поперечном направлениях кристаллов $Mg(OH)_2$ находятся в пределах от 0,2 до 1 мкм, при толщине 15–70 нм. Размеры ромбоэдрических кристаллов кальцита и доломита варьируются в пределах от 2 до 30 мкм. Анализируя данные рис. 4, можно отметить, что в результате искусственной карбонизации образцов из доломитовой извести, полученной обжигом доломита при 820 °С, формируется прочная структура с кристаллами различной формы и размеров, в которой гидроксид магния, не вступивший в реакцию, веро-

ятно, выполняет роль уплотняющего компонента, имея наименьшие размеры кристаллов, в том числе в нанодиапазоне. Высокие значения прочности при сжатии, полученные в краткие сроки, объясняются тем, что остатки неразложившегося доломита, очевидно, являются активными компонентами, влияющими на структурообразование данной системы, выступая в качестве «подложки» для ориентированной кристаллизации новообразованного кальцита на поверхности доломитовых частиц с формированием прочных когезионных контактов, создавая, таким образом, компактную сросшуюся структуру из кристаллов кальцита, доломита и гидроксида магния, не вступивших в реакцию карбонизации.

Результаты, полученные в лабораторных условиях, были апробированы в условиях промышленного предприятия. На производственной линии по производству изделий полусухого прессования предприятия ООО «Канон», расположенного в пос. Зуя (Республика Крым) была изготовлена опытно-промышленная партия полнотелых изделий (одинарный кирпич) на основе доломитовой извести, произведенной в лабораторных условиях путем обжига доломита при температуре 820 °С. Размеры изделий ($L \times B \times H$): 250 × 120 × 65 мм. При изготовлении опытно-промышленной партии карбонизацию изделий осуществляли в течение 90 мин в карбонизационной камере собственной конструкции. После принудительного карбонатного твердения изделия высушивали до постоянной массы и определяли их основные физико-механические характеристики. Результаты испытаний изделий опытно-промышленной партии представлены в табл. 6.

Анализ опытных данных табл. 6 показал, что значения прочности на сжатие изделий из опытно-промышленной партии (19,9 МПа), полученных при удельном давлении прессования 30 МПа, ниже чем у опытных лабораторных образцов (31–34 МПа),

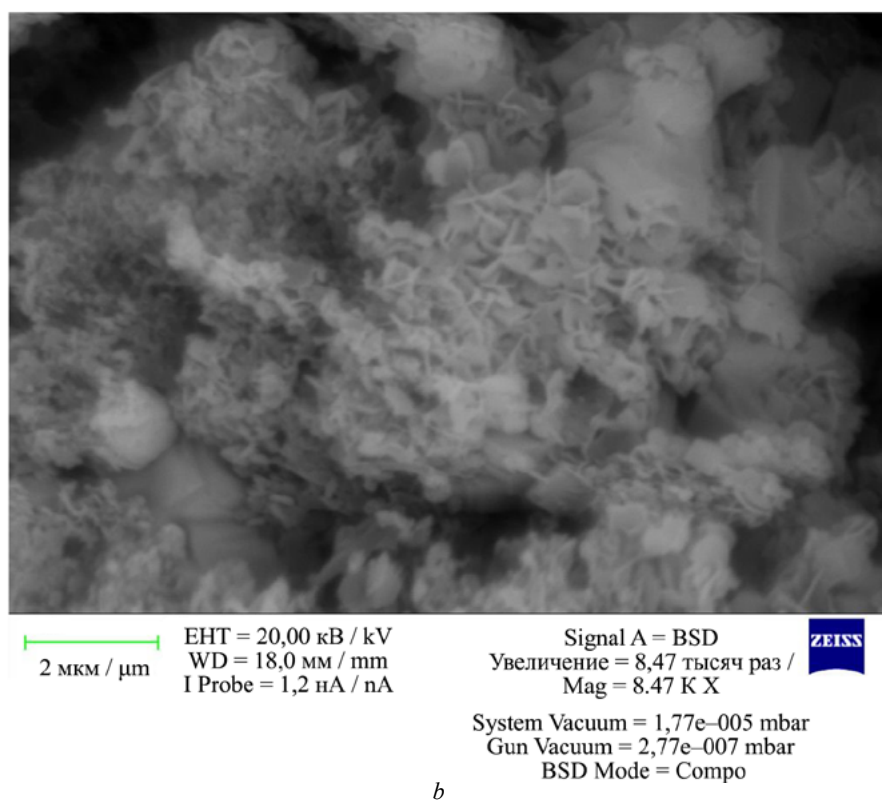
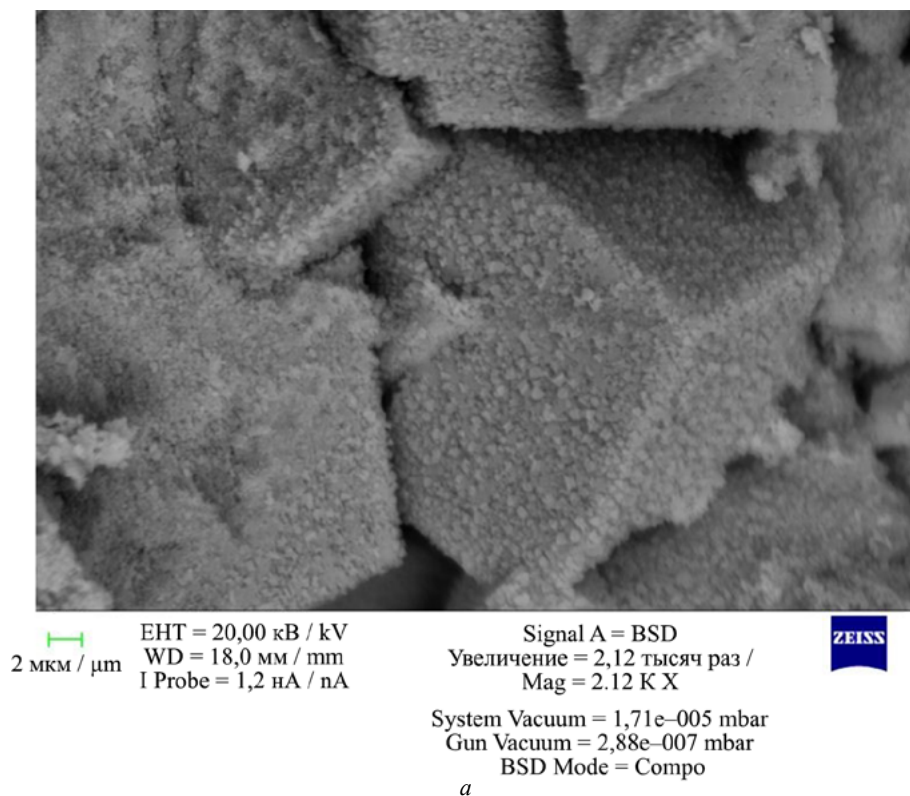


Рис. 4. Микроструктура карбонизированного материала образцов на основе доломитовой извести, полученной при 820 °С и начальном водосодержании смеси 20 %: *a* — кристаллы доломита; *b* — кристаллы брусита

Fig. 4. The microstructure of carbonized sample material based on dolomite lime obtained at 820 °C and initial mixture water content of 20 %: *a* — dolomite crystals; *b* — brucite crystals

Табл. 6. Физико-механические характеристики опытных образцов кирпича в зависимости от условий получения
Table 6. Physicomechanical characteristics of test brick samples depending on obtaining conditions

Номер п/п / Item number	Условия получения / Obtaining conditions		Свойства опытных образцов кирпича после карбонизации / Properties of test brick samples after carbonization		
	Давление прессования $p_{уд}$, МПа / Pressing pres- sure p_{sp} , МПа	Водосодержание сырьевой смеси, % / Raw mixture water content, %	Предел прочности при изгибе, МПа / Ultimate bending strength, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа / Ultimate compres- sion strength, МПа	Водопоглощение, % масс. / Water absorption, mass %
1	30	20	3,0	19,9	10,2
2	45		3,5	23,5	8,0
3	60		4,3	30,3	6,9

полученных при аналогичных условиях. Это объясняется значительно большим поперечным сечением изделий по сравнению с опытными лабораторными образцами-цилиндрами и, связанным с этим наличием в центральной части поперечного сечения зоны в виде рыхлого ядра, состоящей из непрореагировавшей с CO_2 сырьевой смеси. Прочность изделий определяет образовавшийся в результате реакции карбонизации карбонатный слой, величина которого составляет от 30 до 35 мм. Можно предположить, что прочность на сжатие закарбонизированной части изделий из опытно-промышленной партии соответствует прочности лабораторных образцов.

С увеличением удельного усилия прессования до 45 и 60 МПа толщина карбонизированного слоя в изделиях из опытно-промышленной партии уменьшается за счет большей плотности и, соответственно, снижения газопроницаемости материала. При этом следует отметить, что прочностные показатели изделий увеличиваются и снижается их водопоглощение. Следовательно, можно заключить, что при давлениях прессования до 30 МПа прочностные свойства материалов карбонатного твердения формируются, главным образом, за счет карбонизационного твердения путем формирования прочного карбонатного каркаса, а при увеличении удельного давления прессования, в большей степени, за счет контактного взаимодействия частиц.

В результате проведения опытно-промышленной проверки научно-практических результатов, полученных в лабораторных условиях, установлено, что физико-механическими свойствами изделий принудительного карбонатного твердения можно управлять, как путем изменения продолжительности выдерживания изделий в среде с повышенной концентрацией CO_2 , так и изменяя геометрические параметры изделий. Из полученных результатов следует, что наиболее эффективной конфигурацией изделий принудительного карбонатного твердения является пустотелая форма с толщиной стенок, например, до 30–40 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что потенциал доломитового сырья в производстве строительных материалов и изделий используется не в полной мере. Из данного сырья возможно получение вяжущего с низкой эмиссией CO_2 . Суть данного утверждения заключается в определении минимально возможной температуры обжига доломитового сырья, которая бы обеспечивала оптимальный фазовый состав извести, обеспечивающий получение материала карбонатного твердения с высокими механическими характеристиками. Для исследуемой доломитовой породы минимальная температура обжига, обеспечивающая необходимые требования составила 820 °С. Следует также учесть, что значение температуры будет варьироваться в зависимости от химического состава исходного доломитового сырья, что предопределяет более глубокий уровень исследований в аспекте технологии получения предлагаемого вяжущего и его свойств. Подбор минимальной температуры обжига будет способствовать снижению выделяющегося в данном процессе углекислого газа, а направление этого CO_2 в технологический процесс в качестве сырьевого компонента — его минимальному выбросу в атмосферу. Таким образом, получая доломитовую известь и, используя отходящий углекислый газ в технологическом процессе, получается замкнутая ресурсосберегающая технология производства низкоуглеродных строительных изделий карбонатного твердения. При этом данные изделия не требуют длительной выдержки для достижения ими марочной прочности, как например, на основе портландцемента, так как основные физико-механические характеристики карбонизированного материала достигаются при завершении технологического процесса производства. Такие аспекты производства, как невысокая температура обжига, использование вторичного сырья (отсевы доломитов, выбросы CO_2) и быстрый технологический цикл снижают себестоимость готовых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ekolu S.O.* A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 306–320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
2. *Ruan S., Unluer C.* Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 80. Pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
3. *Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A.* CO₂ uptake potential due concrete carbonation: A case study // *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 6. Pp. 147–161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
4. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
5. *Gartner E.* Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements // *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34. Issue 9. Pp. 1489–1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
6. *Jang J.G., Kim G.M., Kim H.J., Lee H.K.* Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 762–773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017
7. *Хохряков О.В., Хозин В.Г., Харченко И.Я., Газданов Д.В.* Цементы низкой водопотребности — путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1145–1152. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152
8. *Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H.* Sustainable cement production — present and future // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41 (7). Pp. 642–650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
9. *Panesar D.K., Mo L.* Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 38. Pp. 40–49. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009
10. *Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A.* Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 186. Pp. 933–942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
11. *Польманн Х.* Пути сокращения выбросов CO₂ при производстве альтернативных цементов // *Цемент и его применение*. 2016. № 2. С. 89–93.
12. *Shi C., Jimenez A.F., Palomo A.* New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to portland cement // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Issue 7. Pp. 750–763. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016
13. *Vandeperre L., Liska M., Al-Tabbaa A.* Microstructures of reactive magnesia cement blends // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. Issue 8. Pp. 706–714. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002
14. *Unluer C., Al-Tabbaa A.* Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 59. Pp. 55–65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005
15. *Harrison A.J.W.* The properties of reactive magnesia — portland cement — pozzolan blends // *Concrete in the Third Millennium : proceedings CIA Conference*. CIA : Brisbane, Australia, 2003. URL: <https://www.tececo.com.au/files/conference%20papers/PropertiesofMagnesiaPortlandCementPozzolanBlends8thIntSemConcreteandBuildMatNewDelhi181103.pdf>
16. *Liska M., Al-Tabbaa A.* Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimisation // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Issue 8. Pp. 1789–1797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007
17. *Cherubini F., Raue M., Ulgiati S.* LCA of magnesium production // *Resources, Conservation and Recycling*. 2008. Vol. 52. Issue 8–9. Pp. 1093–1100. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.001
18. *Unluer C., Al-Tabbaa A.* Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 87–97. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.009
19. *Dung N.T., Lesimple A., Hay R., Celik K., Unluer C.* Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 125. P. 105894. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105894
20. *Unluer C.* Carbon dioxide sequestration in magnesium-based binders // *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials*. 2018. Pp. 129–173. DOI: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00007-1
21. *Ruan S., Unluer C.* Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 159. Pp. 62–73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.044
22. *Dung N.T., Unluer C.* Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 103. Pp. 160–169. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.011

23. Al-Tabbaa A. Reactive magnesia cement. *Eco-efficient Concrete*. 2013. Pp. 523–543. DOI: 10.1533/9780857098993.4.523
24. Shen W., Cao L., Li Q., Wen Z., Wang J., Liu Y. et al. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with portland cement // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 131. Pp. 20–27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.082
25. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A., Bakhtina T. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary lime-stone raw materials // *Malaysian Construction Research Journal*. 2017. Vol. 23. Issue 3. Pp. 15–26.
26. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 032032. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032032
27. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. Pp. 187–194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187

Поступила в редакцию 17 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 19 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2019 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Тамара Алексеевна Бахтина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Николай Владимирович Любомирский — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Александр Сергеевич Бахтин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@gmail.com;

Виталий Витальевич Николаенко — старший преподаватель кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 891109, Scopus: 57205434653, ResearcherID: AAD-2526-2019, ORCID: 0000-0002-7095-7946; t.bakhtina83@gmail.com.

REFERENCES

1. Eklou S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:306-320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
2. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 80:104-114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
3. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A. CO₂ uptake potential due concrete carbonation: A case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2017; 6:147-161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
4. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.

- Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
5. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(9):1489-1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
6. Jang J.G., Kim G.M., Kim H.J., Lee H.K. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:762-773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017
7. Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya., Gazdanov D.V. Low water demand cements — way of efficient use of clinker and mineral fillers in concretes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(10):109:1145-1152. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152 (rus.).
8. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production — present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(7):642-650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
9. Panesar D.K., Mo L. Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing. *Cement and Concrete Composites*. 2013; 38:40-49. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009
10. Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A. Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:933-942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
11. Poellmann H. Mineralogical strategies to reduce CO₂ in the fabrication of alternative cements. *Journal Cement and its Applications*. 2016; 2:89-101.
12. Shi C., Jimenez A.F., Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(7):750-763. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016
13. Vandeperre L., Liska M., Al-Tabbaa A. Microstructures of reactive magnesia cement blends. *Cement and Concrete Composites*. 2008; 30(8):706-714. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002
14. Unluer C., Al-Tabbaa A. Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions. *Cement and Concrete Research*. 2014; 59:55-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005
15. Harrison A.J.W. The properties of reactive magnesia — portland cement — pozzolan blends. *Concrete in the Third Millenium : proceedings CIA Conference*. CIA : Brisbane, Australia, 2003. URL: <https://www.tececo.com.au/files/conference%20papers/PropertiesofMagnesiaPortlandCementPozzolanBlends8thIntSemConcreteandBuildMatNewDelhi181103.pdf>
16. Liska M., Al-Tabbaa A. Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimization. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(8):1789-1797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007
17. Cherubini F., Rauge M., Ulgiati S. LCA of magnesium production. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008; 52(8-9):1093-1100. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.001
18. Unluer C., Al-Tabbaa A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements. *Cement and Concrete Research*. 2013; 54:87-97. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.009
19. Dung N.T., Lesimple A., Hay R., Celik K., Unluer C. Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations. *Cement and Concrete Research*. 2019; 125:105894. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105894
20. Unluer C. Carbon dioxide sequestration in magnesium-based binders. *Carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials*. 2018; 129-173. DOI: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00007-1
21. Ruan S., Unluer C. Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 159:62-73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.044
22. Dung N.T., Unluer C. Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2018; 103:160-169. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.011
23. Al-Tabbaa A. Reactive magnesia cement. *Eco-Efficient Concrete*. 2013; 523-543. DOI: 10.1533/9780857098993.4.523
24. Shen W., Cao L., Li Q., Wen Z., Wang J., Liu Y. et al. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 131:20-27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.082
25. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A., Bakhtina T. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials. *Malaysian Construction Research Journal*. 2017; 23(3):15-26.
26. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:032032. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032032
27. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*. 2019; 974:187-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187

Received October 17, 2019.

Adopted in a revised form on November 19, 2019.

Approved for publication December 28, 2019.

B I O N O T E S: **Tamara A. Bakhtina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Nikolay V. Lyubomirskiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Aleksandr S. Bakhtin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@gmail.com;

Vitaliy V. Nikolaenko — senior lecturer at the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 891109, Scopus: 57205434653, ResearcherID: AAD-2526-2019, ORCID: 0000-0002-7095-7946; t.bakhtina83@gmail.com.

Исследование стабилизации мергеля органическими вяжущими

Е.И. Королев, Е.Н. Сычкина, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен мергель, используемый в качестве основного материала для дорожных насыпей и оснований кустовых площадок на некоторых нефтяных месторождениях Пермского края. Этот грунт имеет различные прочностные характеристики в сухом и водонасыщенном состоянии: достаточно высокие значения сопротивления одноосному сжатию в сухом состоянии, которые резко снижаются при контакте с атмосферными или грунтовыми водами. При увлажнении и разрушении мергель способен переходить в пластичное состояние, сопровождаемое резким понижением значений прочности и возрастанием деформируемости.

Материалы и методы. Осуществлен подбор оптимального вяжущего, выполнены испытания прочности на образцах, изготовленных на основе различного содержания вяжущего и периода отверждения. Рассматриваемый параметр прочности — предел прочности при одноосном сжатии. Часть лабораторных испытаний проведена на искусственном мергеле, который был воссоздан по гранулометрическому составу в лабораторных условиях для расширения статистических данных испытаний. Для нестабилизированного мергеля проведены лабораторные исследования по определению оптимальной влажности, плотности частиц грунта, пределов текучести и пластичности. Отверждение образцов происходило в различных температурных условиях.

Результаты. Исследование как стабилизированного, так и нестабилизированного грунта сфокусировано в основном на показателях прочности, изменениях пластических свойств, требованиях к уплотнению, соотношении параметра прочности и характеристик сжимаемости образцов мергеля. Отмечено снижение плотности и влажности с повышением количества вяжущего в образце. Значительное улучшение и стабилизация изучаемых образцов наблюдается при 4%-ном содержании вяжущего.

Выводы. Доказано многократное возрастание прочности мергеля при его стабилизации, предложен оптимальный вид вяжущего и показаны зависимости прочности образцов грунта от содержания вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мергель, стабилизация, вяжущее, портландцемент, известь, дорожная насыпь, модуль упругости, прочность, гранулометрический состав

Благодарность. Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Дитмару Адаму за курирование данного исследования. Экспериментальная работа, представленная в настоящей статье, выполнена на базе лаборатории Института геотехники Венского технического университета в 2019 г. Авторы также благодарят сотрудников лаборатории за оказанную помощь.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев Е.И., Сычкина Е.Н., Пономарев А.Б. Исследование стабилизации мергеля органическими вяжущими // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 58–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.58-71

Study of marl stabilization with organic binders

Egor I. Korolev, Evgeniya N. Sychkina, Andrey B. Ponomaryov

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers marl used as the primary material for road embankments and multiple-well platforms at some oil fields of the Perm' Territory. This ground has different strength parameters in dry and water-saturated conditions. Rather high values of the resistance to uniaxial compression in dry conditions abruptly fall when contacting atmospheric or ground water. Being damped and destroyed, marl is capable of transiting into the plastic state with abrupt reduction of strength and growth of deformability.

Materials and methods. The optimal binder was selected. Strength tests were performed on samples made based on of various binder contents and hardening periods. The considered strength parameter is the ultimate uniaxial compression strength. A part of the laboratory tests was carried out with artificial marl, which was recreated by granulometric composition to expand the statistical data of the tests. Laboratory studies for non-stabilized marl were conducted to determine the optimal humidity, density of ground particles, yield limit, and plastic limit. The hardening of the samples occurred under different temperature conditions.

Results. The study of both stabilized and non-stabilized ground samples is mainly focused on strength indicators, changes in plastic properties, compaction requirements, correlation of strength, and compressibility characteristics of the marl samples.

There is a decrease in density and humidity, with an increase in the amount of binder in the sample. Significant improvement and stabilization of the studied samples were observed for 4-% binder content.

Conclusions. The study proved many increases in the strength of marl during its stabilization. The optimal type of binder was proposed. Dependences of the strength of ground samples on the binder content were shown

KEYWORDS: marl, stabilization, binder, Portland cement, lime, road embankment, elasticity modulus, strength, granulometric composition

Acknowledgement. The authors would like to express their sincere gratitude to Professor Dietmar Adam for his supervising this study. The experimental work presented in this paper was performed at Institut für Geotechnik (Technische Universität Wien (TU Wien)), Institute of Geotechnics, Technical University of Vienna) in 2019. Also, the authors thank the laboratory staff for their help.

FOR CITATION: Korolev E.I., Sychkina E.N., Ponomaryov A.B. Study of marl stabilization with organic binders. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):58-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.58-71 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Местные грунты, используемые для отсыпки земляного полотна подъездных дорог к нефтяным месторождениям, зачастую могут иметь особые свойства. Ввиду отдаленности площадок строительства, подъездных дорог нефтяных месторождений от объектов строительной индустрии, замена грунта для отсыпки земляного полотна является сложной и экономически неоправданной задачей. Объектом исследования является мергель, используемый в качестве основного материала для дорожных насыпей и оснований кустовых площадок на некоторых нефтяных месторождениях Пермского края. Этот грунт имеет различные прочностные характеристики в сухом и водонасыщенном состоянии: достаточно высокие значения сопротивления одноосному сжатию в сухом состоянии, которые резко снижаются при контакте с атмосферными или грунтовыми водами [1]. При увлажнении и разрушении мергель способен переходить в пластичное состояние, сопровождаемое резким понижением значений прочности и возрастанием деформируемости. Кроме того, строительство кустовых площадок и дорожных насыпей на месторождении осложнено наличием слабых и переувлажненных грунтов в основании.

В настоящее время конструкции дорожных насыпей и кустовых площадок, сложенных из мергеля, требуют ежегодного ремонта после весенних паводков (рис. 1).

Данная работа призвана решить вопрос об увеличении эксплуатационных показателей и долговечности конструкций грунтовых сооружений, сложенных из мергеля при помощи стабилизации грунта органическими вяжущими. Для достижения

поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

- 1) определены физико-механические характеристики образцов мергеля, отобранных с откоса насыпи подъездной дороги нефтяного месторождения;
- 2) подобрано вяжущее для стабилизации образцов по предварительно определенному гранулометрическому составу грунта;
- 3) подготовлены образцы с различным содержанием вяжущего;
- 4) проведены испытания образцов на одноосное сжатие;
- 5) сформулированы выводы по результатам исследования.

Мировой опыт показывает, что стабилизация используется для осушения грунтов на строительных площадках, а также позволяет существенно повысить прочность и устойчивость грунтовой конструкции, улучшая пластические, уплотняющие и прочностные свойства грунта [10]. Исследованиями стабилизации грунтов занимались многие отечественные и зарубежные ученые [2, 5–18]. Ранее в работе [2] было доказано увеличение физико-механических и прочностных свойств высокопластичной глины при помощи стабилизации известью. Аналогичные результаты наблюдались в исследовании стабилизации мелкозернистых грунтов при помощи цемента и золы [8]. Микроскопический анализ частиц мергелевой глины, стабилизированной известью, показывает, что длительная обработка известью вызвала уменьшение размера частиц в образце, что может привести к ухудшению геотехнических свойств данного грунта, однако испытаний образцов на прочность не проводилось [11]. По имеющимся данным [12], образцы мергеля демонстрируют увеличение жесткости и прочности при сдвиге



Рис. 1. Состояние дорожной насыпи на 2019 г.: щебень, вдавленный в верхний слой насыпи; открытые обломки мергеля, подверженные разрушению на откосах

Fig. 1. Condition of a road embankment in 2019: crushed stone pressed into the top layer of the embankment, open fragments of marl subjected to destruction on the slopes

при стабилизации известью, вместе с тем физические характеристики изученного мергеля отличны от мергеля, рассмотренного в данной работе. Таким образом, вопрос стабилизации мергеля является малоизученным. Особый и первостепенный интерес представляет изучение стабилизации мергеля с точки зрения его прочностных параметров, ввиду неоднозначных свойств грунта в сухом и водонасыщенном состояниях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования были отобраны образцы грунта с поверхности откоса дорожной насыпи месторождения. Экспериментальная часть исследования проводилась на базе лаборатории Института геотехники Венского технического университета, где были определены физико-механические характеристики, гранулометрический состав грунта и проведены испытания на одноосное сжатие согласно европейским нормативам.

Определение оптимальной влажности проводилось по методу Проктора в соответствии с ASTM D1557. С помощью перемешивающей машины подготовлено четыре образца различной влажности,

уплотненных в цилиндрической форме диаметром 100 мм. Уплотнение производилось в три слоя. Перед каждой последующей засыпкой слоя в форму, уплотненная поверхность слегка разрыхлялась для более плотного сцепления слоев друг с другом. После уплотнения образцы были приведены к единому объему путем среза ножом выступающих кромок грунта, взвешены и помещены в сушильный шкаф. Сухие образцы вновь взвешены. Полученные значения оптимальной влажности могут быть использованы для определения фактического коэффициента уплотнения при отсыпке насыпи основания автомобильных дорог [21].

Определение плотности частиц грунта осуществлялось в соответствии со стандартом DIN EN ISO 17892-3. Испытание проводилось пикнометрическим методом. Для данного теста было отобрано по 20 г грунта, выбран пикнометр, подготовлена песчаная баня. Процедура взвешивания производилась при помощи точных весов для пустого пикнометра с крышкой, для пикнометра с сухим грунтом, а также для пикнометра, заполненного дистиллированной водой. Кипение дистиллированной воды, перемешанной с грунтом, происходило в течение двух часов для удаления абсорбированного воз-

духа и расчленения агрегатов глинистого грунта. В остывший пикнометр была долита дистиллированная вода до верха крышки, образец взвешен при помощи точных весов. Измерялась температура воды для более точного определения объема воды в пикнометре. Результаты измерений занесены в протокол испытаний.

Предел текучести и предел пластичности устанавливались в соответствии с ISO/TS 17892-12. Искомые значения определялись как пределы Аттерберга, для этого использовался аппарат Касагранде и аппарат падающего конуса. Данные испытания предназначены для грунтов с содержанием мелких частиц более 40 %. Образцы мергеля высушивались в печи при температуре 50 °C и просеивались до фракции < 0,4 мм. После добавления дистиллированной воды к сухому материалу образцы твердели в течение нескольких часов в запечатанном контейнере непосредственно до момента проведения испытаний.

Ввиду того, что гранулометрический состав оказывает значительное влияние на физико-механические свойства грунта [20], его определение необходимо. Гранулометрический состав пробы мергеля определен согласно DIN EN ISO 17892-4 с набором сит 100; 63; 20; 6,3; 2; 0,63; 0,2; 0,063. От объема частиц наименьшего размера была взята навеска 30 г и разбавлена с водой для определения размера частиц аэрометрическим методом. Водяная суспензия грунта просеяна через сито с размером отверстий 0,02 мм. Суспензия, пропущенная через сито 0,02 мм, была залита в прозрачный цилиндр, добавлена вода с 25%-ным раствором аммиака концентрацией 0,5 см³/л для проведения испытания по определению размера частиц грунта согласно нормативу.

В связи с ограниченным объемом мергеля отобранного для испытаний и необходимости статистической обработки данных, было принято решение создать пробы искусственного мергеля, используя данные гранулометрического состава пермского мергеля и мергель, имеющийся в наличии в лаборатории Венского технического университета. По полученным данным размера частиц пермского мергеля создан искусственный мергель путем смешивания предварительно просеянных грунтов различной крупности. Для искусственной смеси грунта определены размеры частиц по методике, описанной выше.

Опираясь на данные кривой гранулометрического состава исследуемых образцов, подобран вид вяжущего и подготовлены образцы. Влажность подготавливаемых наборов грунта была доведена до оптимальной, подготовлена смесь вяжущего. Перемешивание вяжущего с грунтом произведено вручную. Отделены массы грунта с 2 и 4 % вяжущего по влажной массе образца.

По итогам уплотнения образцов получено:

- два образца оригинального мергеля с 2-х и 4%-ным содержанием вяжущего по влажной массе грунта соответственно;
- девять образцов искусственного мергеля: образец без вяжущего и по четыре образца с 2-х и 4%-ным содержанием вяжущего по влажной массе грунта соответственно.

Уплотнение образцов производилось согласно EN 13286-53. Подготовлены цилиндрическая форма для уплотнения образцов диаметром 56 мм и аппарат осевого сжатия WILLE Geotechnik UL 25. Согласно стандарту, уплотнение происходило постепенно до максимальной нагрузки на образец в 1000 кПа. Масса подготовленных наборов оригинального и искусственного мергелей была разделена на равные части для равности объемов уплотняемых образцов. Данный метод позволил обеспечить однородность уплотнения для всех образцов, а также наиболее достоверно воспроизвести метод уплотнения грунта на строительной площадке самоходными катками. Образцы были помещены в пластиковые контейнеры во избежание потери влаги во время твердения. Для отслеживания динамики набора прочности стабилизированных образцов разработан план хранения и испытания образцов на одноосное сжатие, представленный в табл. 1.

Условия хранения при температуре 45 °C обеспечили более быстрое твердение образцов и позволили осуществить набор прочности как после твердения в течение 28 сут при температуре 20 °C.

После выдержки образцы испытаны на одноосное сжатие. Статическое одноосное сжатие используется для вычисления физических свойств грунта. Во время испытания происходит разрушение образца грунта внешней фиксированной нагрузкой, во время которого измеряют образовавшиеся деформации [19].

По результатам испытаний на одноосное сжатие были построены диаграммы набора прочности, рассчитаны модуль упругости, сухая и влажная плотность, а также влажность образцов. Данный тест позволил выявить насколько хорошо работает вяжущее, т.е. насколько эффективна стабилизация грунта в количественном отношении к вяжущему, а также к его типу. Тест на одноосное сжатие проводился согласно EN ISO 17892-7 с использованием аппарата осевого сжатия WILLE Geotechnik UL 25. Испытания проводились в соответствии с планированием эксперимента, представленным в табл. 1. По каждой схеме готовилось по одному образцу. Перед началом испытаний каждый образец взвешивался, измерялись его геометрические размеры. При нагружении задавались следующие параметры разрушения образца: опускание пресса со скоростью 0,2 %/мин по высоте образца, согласно нормативу. Максимальная дефор-

Табл. 1. Планирование экспериментов и условия хранения образцов

Table 1. Experiment planning and sample storage conditions

Наименование образца / Sample denomination	Время твердения, сут / Hardening time, day	Условия твердения / Hardening conditions
Искусственный мергель, 0 % вяжущего / Artificial marl, 0 % of binder	1	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	3	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	3	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	3	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	3	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 2 % вяжущего / Original marl, 2 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 2 % вяжущего / Original marl, 2 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 4 % вяжущего / Original marl, 4 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 4 % вяжущего / Original marl, 4 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation

мация образца была назначена равной 20 %, максимальная нагрузка — 10 МПа. Измерения производились через каждые 5 с. После разрушения образец помещен в сушильный шкаф до полного удаления влаги и определения сухой массы образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно протоколам испытаний были определены: оптимальная влажность W_{opt} , плотность частиц грунта ρ_s , предел текучести W_L и предел пластичности W_p . Итоги определения физических характеристик сведены в табл. 2. Результатом испытаний по определению гранулометрического состава как оригинального, так и искусственного мергеля стала кривая гранулометрического состава, приведенная на рис. 2 и 3 соответственно.

По данным рис. 2 можно сделать вывод о том, что распределение количества частиц различного размера оригинального и искусственного образцов мергеля схожи. Ярко выраженное массовое преобла-

дание крупных или мелких частиц в образцах отсутствует. Таким образом, учитывая что цемент обычно используется для стабилизации грунтов с преобладанием крупных частиц, а известь — для стабилизации мелкозернистого грунта, для наиболее надежной стабилизации грунта было принято использование вяжущего в виде смеси цемента марки ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н, соответствующего ГОСТ 31108-2003, и гашеной извести в процентном соотношении 50/50. ЦЕМ II — портландцемент с известняком от 6 до 20 %, класса прочности 32,5, нормальноотвердеющий.

Полученные диаграммы набора прочности на осевое сжатие и изменения модуля упругости относительно возраста образца, кривые зависимости деформаций образца от вертикальной нагрузки представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Значения механических характеристик мергелей, полученные в результате испытаний оригинального мергеля, приведены в табл. 3.

В рамках испытаний для оригинального мергеля были выполнены условия твердения в течение

Табл. 2. Значения некоторых физических характеристик мергеля

Table 2. Values of some physical characteristics of marl

Искомая характеристика / Required characteristic	Единицы измерения / Measurement unit	Значение / Value
Оптимальная влажность W_{opt} / Optimal humidity W_{opt}	%	17
Плотность частиц грунта ρ_s / Ground particle density ρ_s	г/см ³ / g/cm ³	2,62
Предел текучести W_L / Yield limit W_L	%	34
Предел пластичности W_p / Plastic limit W_p	%	22

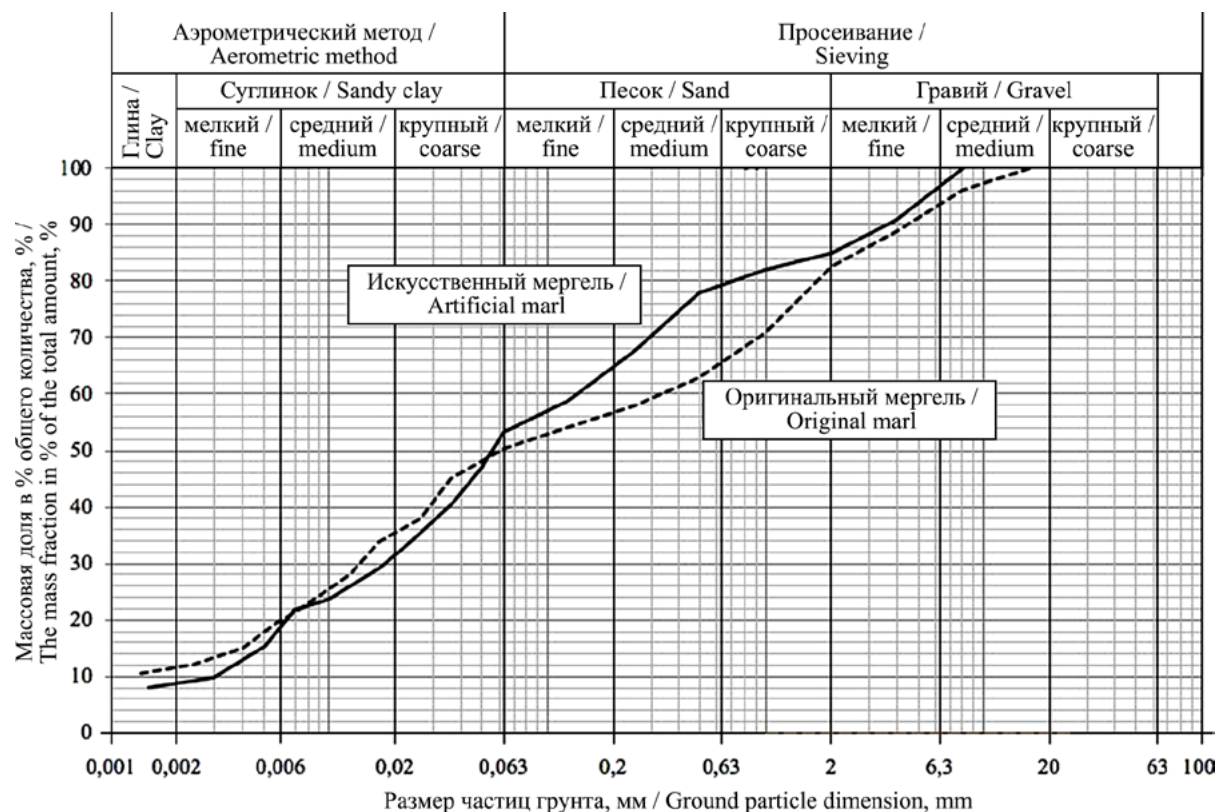


Рис. 2. Кривые гранулометрического состава оригинального и искусственного мергелей

Fig. 2. Granulometric composition curves for original and artificial marls

шести суток при температуре 20 и 45 °С. Согласно данным, приведенным в табл. 3, значение прочности на осевое сжатие для образца № 2 практически в 2 раза превосходит прочность на осевое сжатие для образца № 1. Прочность возрастает от 348,8 до 813,1 кН/м². Такой прирост прочности объясняется условиями хранения образца № 2, обеспечивающими более быстрое твердение. Схожая динамика наблюдается для образцов № 3 и 4 в возрастании прочности на осевое сжатие от 483,8 до 1036 кН/м².

Для уточнения динамики прочностных характеристик стабилизируемого грунта во времени рассматривались испытания на одноосное сжатие искусственного мергеля. По результатам испытаний получены диаграммы набора прочности на осевое сжатие и изменения модуля упругости относитель-

но возраста образца, кривые зависимости деформаций образца от вертикальной нагрузки. Диаграммы представлены на рис. 5 и 6 для грунта с 2%-ным содержанием вяжущего, на рис. 7 и 8 с 4%-ным содержанием вяжущего. Значения физико-механических характеристик искусственного мергеля, определенных по итогам испытаний, сведены в табл. 4.

Результаты испытаний образцов с содержанием 2 % вяжущего показывают увеличение прочности на осевое сжатие более чем в пять раз в течение шести суток твердения при температуре 20 °С от 88,5 до 489,6 кН/м² с одновременным увеличением модуля упругости. Анализируя результаты испытаний образцов № 8 и 9, можно отследить дальнейшее увеличение прочности, благодаря «ускоренным» условиям твердения до 1388,0 кН/м². Схожая ди-

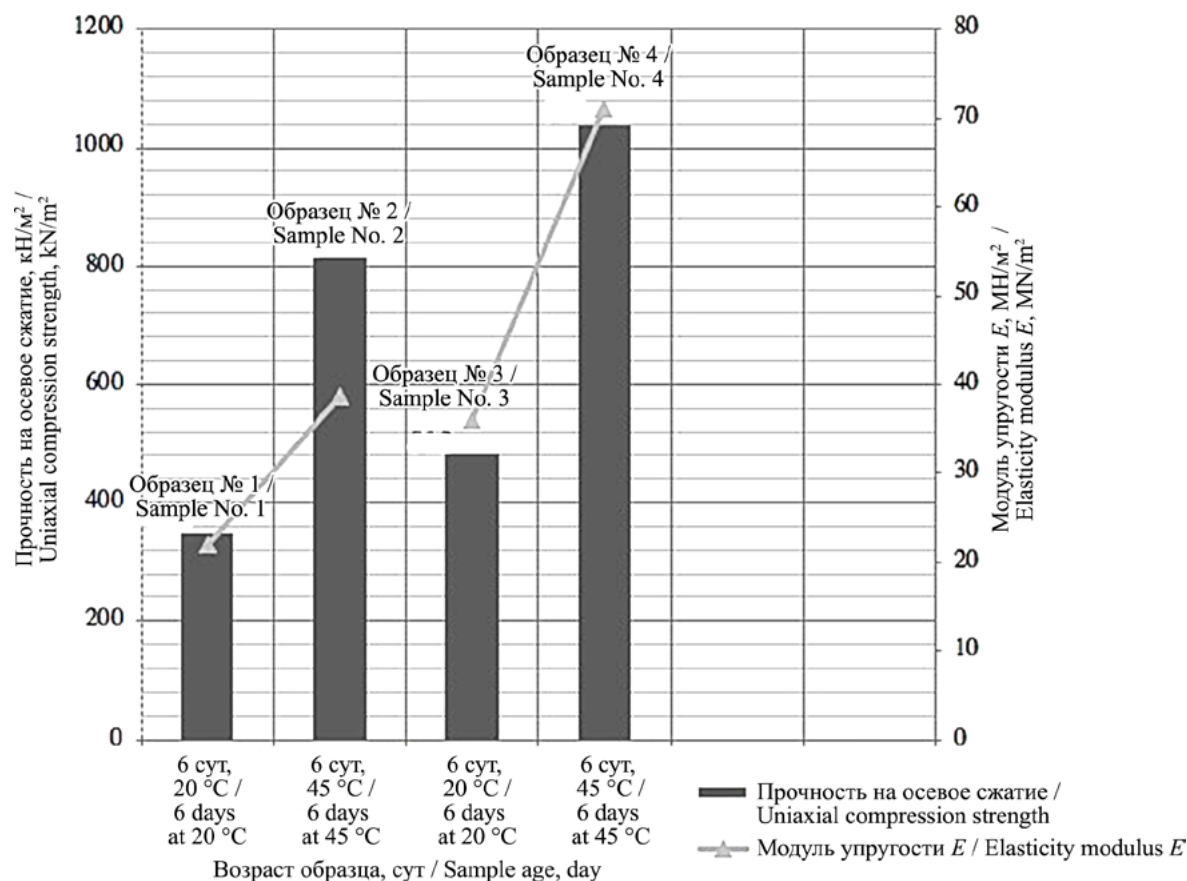


Рис. 3. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов оригинального мергеля во времени

Fig. 3. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for original marl samples

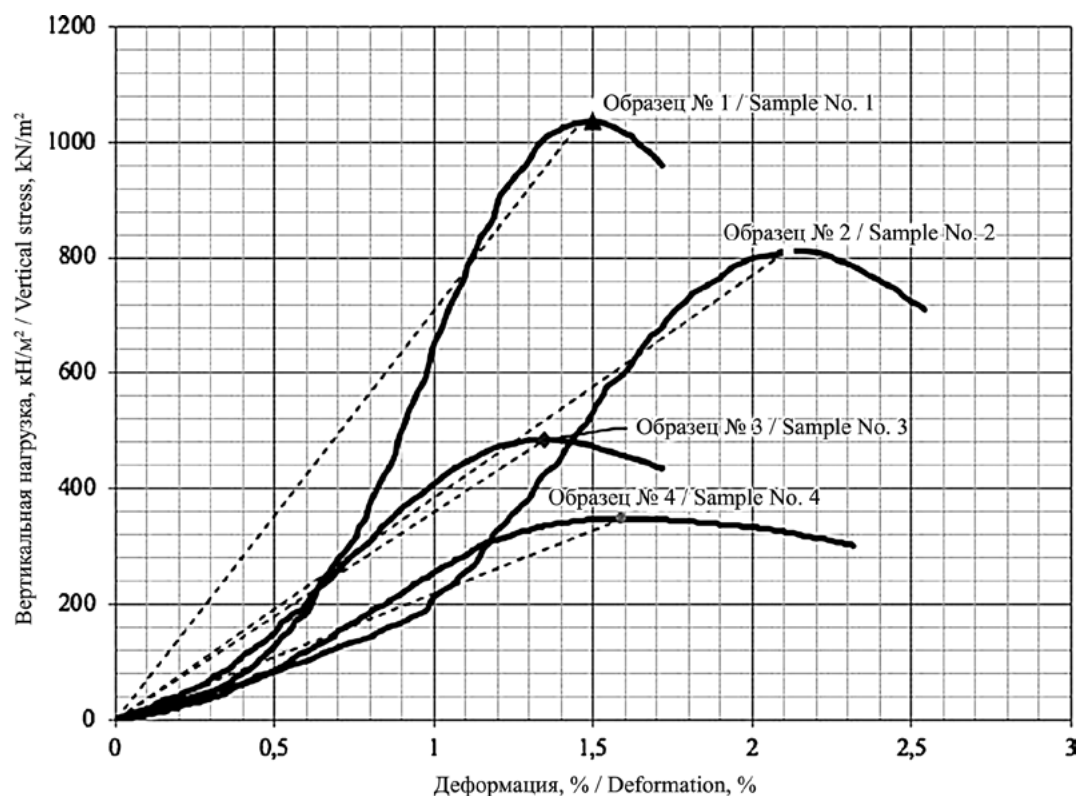


Рис. 4. Кривые нагрузка–деформация для стабилизированных образцов оригинального мергеля

Fig. 4. Stress-deformation curves for stabilized original marl samples

Табл. 3. Результаты испытаний оригинального мергеля

Table 3. Test results for the original marl

Номер образца / Sample number	1	2	3	4
Содержание вяжущего, %, от влажной массы грунта / Binder content, %, of the damp ground mass	2	2	4	4
Возраст образца, сут / условия твердения, °	6 / 20	6 / 45	6 / 20	6 / 45
Прочность на осевое сжатие, кН/м ² / Uniaxial compression strength, kN/m ²	348,8	813,1	483,8	1036,0
Деформация при разрушении, % / Deformation at rupture, %	1,59	2,12	1,35	1,50
Модуль упругости E , МН/м ² / Elasticity modulus E , MN/m ²	21,9	38,6	35,8	71,0
Влажная плотность ρ , г/см ³ / Damp density ρ , g/cm ³	1,91	1,89	1,85	1,85
Сухая плотность ρ_d , г/см ³ / Dry density ρ_d , g/cm ³	1,64	1,64	1,57	1,59
Влажность W , % / Humidity W , %	16,9	15,4	17,6	16,24

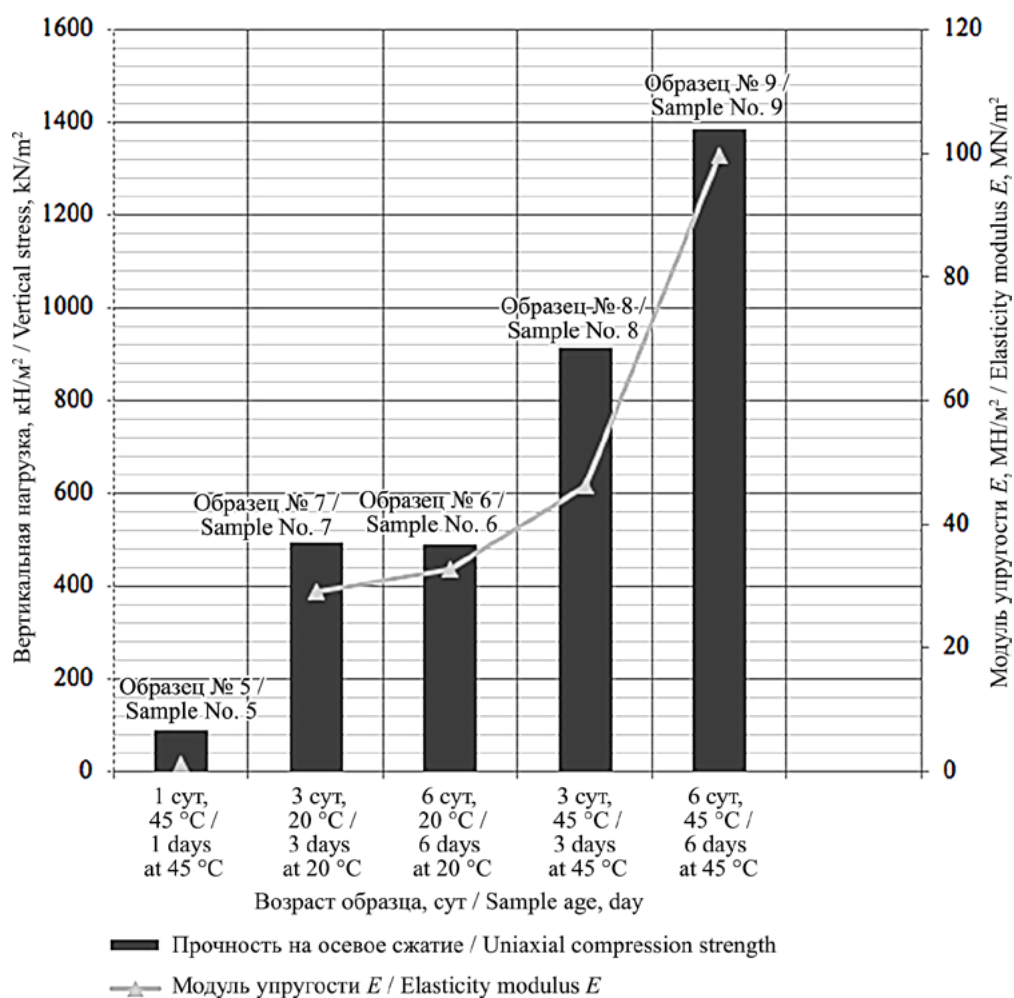


Рис. 5. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов искусственного мергеля с 2%-ным содержанием вяжущего во времени

Fig. 5. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for the artificial marl samples with 2% binder content

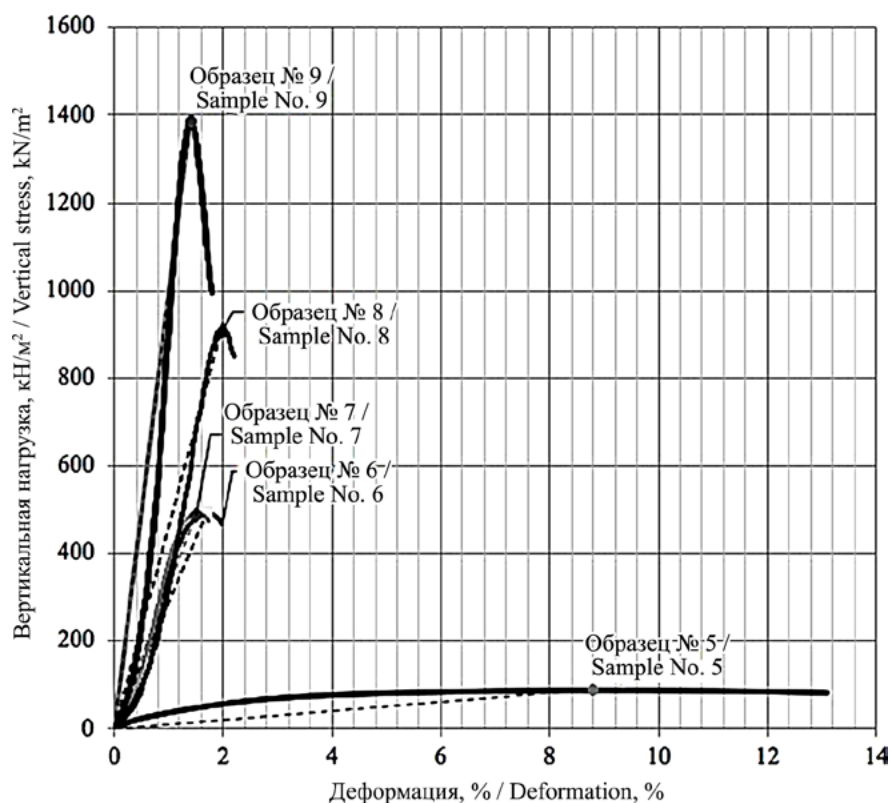


Рис. 6. Кривые нагрузка–деформация для образцов искусственного мергеля с 2%-ным содержанием вяжущего
Fig. 6. Stress-deformation curves for artificial marl samples with 2-% binder content

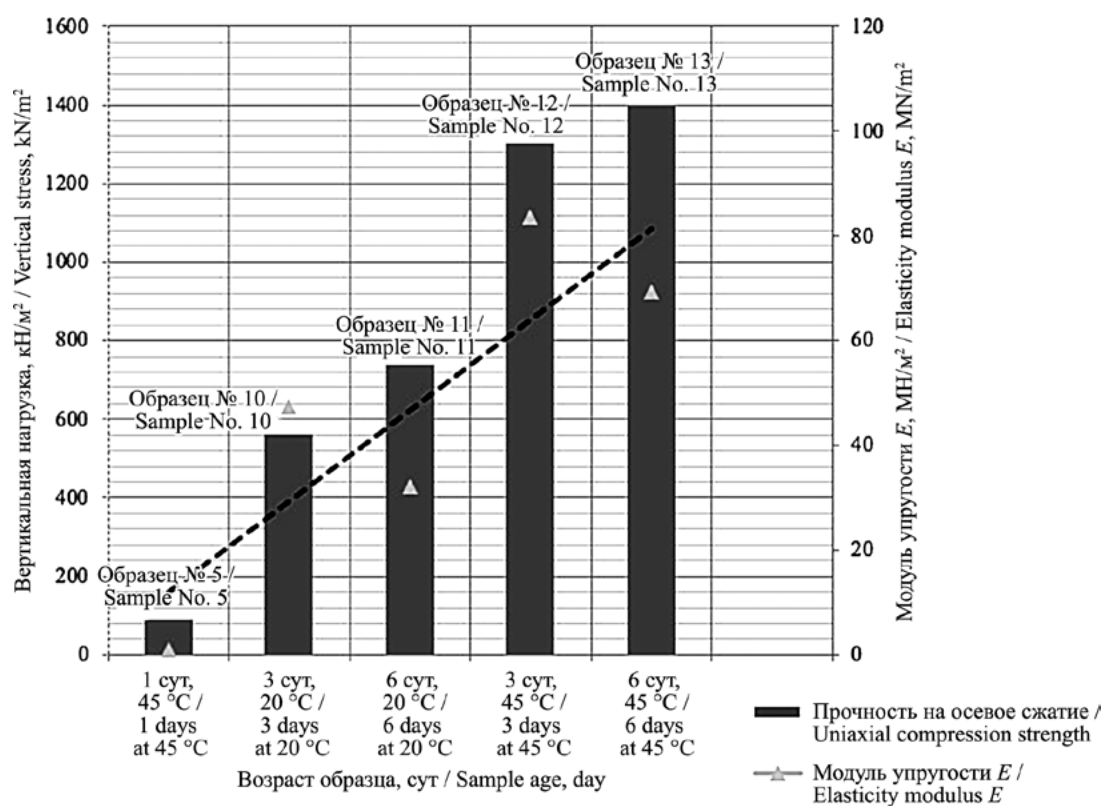


Рис. 7. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов искусственного мергеля с 4%-ным содержанием вяжущего во времени
Fig. 7. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for the artificial marl samples with 4-% binder content

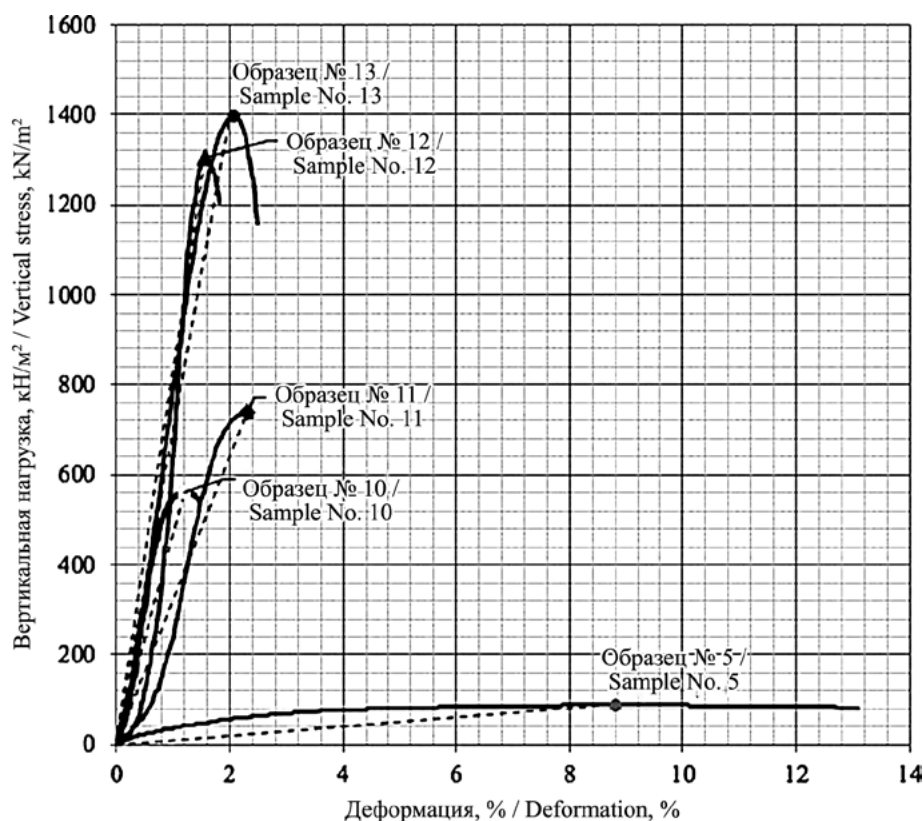


Рис. 8. Кривые нагрузка–деформация для образцов искусственного мергеля с 4%-ным содержанием вяжущего

Fig. 8. Stress-deformation curves for artificial marl samples with 4-% binder content

Табл. 4. Результаты испытаний искусственного мергеля

Table 4. Test results for the artificial marl

Номер образца / Sample number	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Содержание вяжущего, %, от влажной массы грунта / Binder content, %, of damp ground mass	0	2	2	2	2	4	4	4	4
Возраст образца, сут / условия твердения, °C / Sample age, day / hardening conditions, °C	1 / 20	3 / 20	6 / 20	3 / 45	6 / 45	3 / 20	6 / 20	3 / 45	6 / 45
Предел прочности (UCS) q_u , кН/м ² / Ultimate compression strength (UCS) q_u , kN/m ²	88,5	495,2	489,6	913,0	1388,0	559,2	737,0	1304,0	1396,0
Деформация при разрушении, % / Deformation at rupture, %	8,80	1,71	1,52	1,99	1,41	1,19	2,29	1,57	2,05
Модуль упругости E , МН/м ² / Elasticity modulus E , MN/m ²	1	29,0	32,6	46,2	99,6	47,3	32,2	83,7	69,3
Влажная плотность ρ , г/см ³ / Damp density ρ , g/cm ³	2,1	2,03	2,04	2,04	2,03	2,13	2,01	1,99	2,04
Сухая плотность ρ_{d3} , г/см ³ / Dry density ρ_d , g/cm ³	1,79	1,75	1,75	1,77	1,77	1,85	1,74	1,73	1,75
Влажность W , % / Humidity W , %	17,2	16,5	16,1	15,2	14,5	15,2	15,9	15,1	16,7

намика наблюдается для образцов с 4 % вяжущего. Максимальная прочность на осевое сжатие составила 1396,0 кН/м². По диаграммам на рис. 5 и 7 можно сделать вывод о том, что основную прочность образцы набирают в первые три дня после уплотнения образцов, т.е. большая часть вяжущего вступает в реакцию в первые три дня твердения.

Анализируя значения физических характеристик образцов, можно сделать вывод о снижении плотности образцов с увеличением количества вяжущего. Вяжущее имеет меньшую массу и занимает часть объема образца, оказывая влияние на его плотность.

Наблюдается снижение влажности с повышением количества вяжущего в образце. Данная динамика объясняется потребностью цемента и извести во влаге для проведения процесса гидратации. Чем больше вяжущего, тем больше влаги в образце должно быть задействовано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования определены значения физико-механических характеристик мергеля, исполь-

зуемого в качестве материала дорожных насыпей и кустовых площадок на нефтяном месторождении Пермского края.

Исследованием доказано многократное возрастание прочности мергеля при его стабилизации, предложен оптимальный вид вяжущего и показаны зависимости прочности образцов грунта от содержания вяжущего.

По максимальной прочности на осевое сжатие, превышающей 1 МПа, можно утверждать, что вяжущее подобрано правильно, мергель успешно стабилизирован в лабораторных условиях, прочностные характеристики образцов возросли многократно. Однако остается ряд вопросов в изучении стабилизированных образцов мергеля с точки зрения морозостойкости, стабилизации образцов мергеля при влажности как ниже, так и выше оптимальной, детального изучения химического состава мергеля для выявления наиболее экономически выгодного варианта стабилизации, а также рекомендаций по стабилизации мергеля непосредственно на строительной площадке с учетом сложных инженерно-геологических условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N., Kleveko V.I. Use of marl as ground base for embankments. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019. Pp. 280–283. DOI: 10.1201/9780429058882-55
2. Kavak A., Kızılcelik M.M., Bilgen G. Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime // *Proceedings of the XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. Brandl & D. Adam (eds.). 2014. Pp. 665–672.
3. Charles I., Herrier G., Chevalier C., Durand E. A real scale experimental dike in lime-treated soil // *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Pp. 1989–1994.
4. Akazawa Y., Fukuda M., Iwasaki Y., Nakazawa J. Reconstitution of foundation platform of Prasat Suor Prat by compaction of original soil with slaked lime, Angkor Ruins, Cambodia // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. P. 3097.
5. Susinov B., Josifovski J. Lime stabilization of silty soft soil // *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers Conference — 5th iYGE*. 2013. P. 147. DOI: 10.3233/978-1-61499-297-4-147
6. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Сидорович А.С., Вишталенко М.В., Воронин Е.И. Особенности стабилизации глинистых грунтов // *Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах* : мат. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ. Брянск, 01–02 декабря 2015 г. Брянск, 2015. С. 211–215.
7. Пат. РФ № 2592588. Состав для стабилизации глинистого грунта и способ создания грунтовых дорог с его использованием / В.В. Зырянов : патентообл. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН); заявл. № 2015122867/03, 15.06.2015; опубл. 27.07.2016. Бюл. № 21.
8. Vukićević M., Pujević V., Marjanović M., Jocković S., Maraš-Dragojević S. Fine grained soil stabilization using class F fly ash with and without cement // *Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Pp. 2671–2676. DOI: 10.1680/ecsmge.60678
9. Gidigas S.S.R., Gawu S.K.Y. Pozzolana-cement stabilisation of a black cotton soil from Ghana //

XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE). H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014. P. 34.

10. Подольский Вл.П., Нгуен Ван Лонг, Нгуен Дык Ши. О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. 2014. № 1 (33). С. 102–111. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21257222>

11. Elert K., Nieto F., Azañón J.M. Effects of lime treatments on marls // Applied Clay Science. 2017. Vol. 135. Pp. 611–619. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.047

12. Cardoso R., Maranha das Neves E. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment // Engineering Geology. 2012. Vol. 133. Pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.014

13. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Issue 5. Pp. 912–923. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.05.002

14. Soltani A., Taheri A., Khatibi M., Estabragh A.R. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study // Geotechnical and Geological Engineering. 2017. Vol. 35. Issue 4. Pp. 1717–1744. DOI: 10.1007/s10706-017-0204-1

15. Preteseille M., Lenoir T. Mechanical fatigue of a stabilized/treated soil tested with uniaxial and biaxial flexural tests // Transportation Research Proceedings. 2016. Vol. 14. Pp. 1923–1929. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.159

16. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Тулякина Н.А., Вишталенко М.В. Исследование прочности песчаных грунтов, укрепленных цементом

с добавкой «ДорЦем ДС-1», для использования при строительстве оснований автомобильных дорог // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 2. С. 8. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS219.pdf> DOI: 10.15862/09SATS219

17. Akinwumi I.I., Booth C.A., Diwa D., Mills P. Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 169. Issue 4. Pp. 336–345. DOI: 10.1680/jgeen.15.00108

18. Dydyshko P.I., Olkhina S.V., Tarasenko A.V., Rzhantsyn D.A. Stabilization of earthwork by introducing reinforcing additives when mixing soil // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. Issue 7. Pp. 2969–2981. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i7/G6247058719.pdf>

19. Попова П.С., Захаров А.В. Обзор существующих методов определения модуля деформации грунта // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 1. С. 141–149.

20. Черпахин М.В., Шабаетов С.Н. К вопросу о повышении несущей способности дорожных одежд из раздробленных горных пород рационального гранулометрического состава // Россия молодая : сб. мат. IX Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. Кемерово, 18–21 апреля 2017 г. Кемерово, 2017. С. 51005.

21. Таборская О.А. Свойства мезенского мергеля как грунтового материала, перспективы его применения // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых — 2017 : сб. мат. конф. Архангельск, 15–22 апреля 2017 г. Архангельск, 2017. С. 2072. URL: https://narfu.ru/upload/medialibrary/ac8/SBORNIK_-2017.pdf

Поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 7 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Егор Игоревич Королев** — магистрант кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; egorkorolev@yahoo.com;

Евгения Николаевна Сычкина — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 655291; aspirant123@mail.ru;

Андрей Будимирович Пономарев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 412637; spstf@pstu.ru.

REFERENCES

1. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N., Kleveko V.I. *Use of marl as ground base for embankments. Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019; 280-283. DOI: 10.1201/9780429058882-55
2. Kavak A., Kızılcelik M.M., Bilgen G. Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime. *Proceedings of the XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014; 665-672.
3. Charles I., Herrier G., Chevalier C., Durand E. A real scale experimental dike in lime-treated soil. *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 1989-1994.
4. Akazawa Y., Fukuda M., Iwasaki Y., Nakazawa J. Reconstitution of foundation platform of Prasat Suor Prat by compaction of original soil with slaked lime, Angkor Ruins, Cambodia. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013; 3097.
5. Susinov B., Josifovski J. Lime stabilization of silty soft soil. *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers Conference — 5th iYGEC*. 2013; 147. DOI: 10.3233/978-1-61499-297-4-147
6. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Sidorovich A.S., Vishtalenko M.V., Voronin E.I. Features of stabilization of clayey soils. *Problems of innovative biosphere-compatible socio-economic development in the construction, housing and communal and road complexes : materials of the 4th International scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the faculty of construction and the 85th anniversary of BGITU, Bryansk, December 01–02, 2015*. Bryansk, 2015; 211-215. (rus.).
7. Patent Russian Federation No. 2592588. Composition for stabilisation of clay soil and method for creating ground roads using thereof / V.V. Zyryanov; State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC SB RAS). Appl.: No. 2015122867/03, 15.06.2015; publ.: 27.07.2016. Bull. No. 21.
8. Vukićević M., Pujević V., Marjanovi M., Jocković S., Maraš-Dragojević S. Fine grained soil stabilization using class F fly ash with and without cement. *Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 2671-2676. DOI: 10.1680/ecsmge.60678
9. Gidigas S.S.R., Gawu S.K.Y. Pozzolana-cement stabilisation of a black cotton soil from Ghana. *XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014; 34.
10. Podolsky V.I.P., Nguyen Van Long, Nguyen Duc Sy. On the possibility of the expansion of a road construction resource by the soil stabilization and consolidation. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014; 1(33):102. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21257222> (rus.).
11. Elert K., Nieto F., Azañón J.M. Effects of lime treatments on marls. *Applied Clay Science*. 2017; 135:611-619. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.047
12. Cardoso R., Maranha das Neves E. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment. *Engineering Geology*. 2012; 133:76-84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.014
13. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017; 9(5):912-923. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.05.002
14. Soltani A., Taheri A., Khatibi M., Estabragh A.R. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017; 35(4):1717-1744. DOI: 10.1007/s10706-017-0204-1
15. Preteseille M., Lenoir T. Mechanical fatigue of a stabilized/treated soil tested with uniaxial and biaxial flexural tests. *Transportation Research Procedia*. 2016; 14:1923-1929. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.159
16. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Tulyankina N.A., Vishtalenko M.V. The study of strength of sandy soils reinforced with cement with the addition of “DorZem Ds-1”, for use in the construction of foundations of road. *Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(2):8. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS219.pdf> DOI: 10.15862/09SATS219 (rus.).
17. Akinwumi I.I., Booth C.A., Diwa D., Mills P. Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2016; 169(4):336-345. DOI: 10.1680/jgeen.15.00108
18. Dydyshko P.I., Olkhina S.V., Tarasenko A.V., Rzhantsyn D.A. Stabilization of earthwork by introducing reinforcing additives when mixing soil. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019; 8(7):2969-2981. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i7/G6247058719.pdf>
19. Popova P.S., Zakharov A.V. Overview of existing methods for determining the deformation modulus of soil. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2018; 1:141-149. (rus.).
20. Cherepakhin M.V., Shabayev S.N. On the issue of increasing the load-bearing capacity of road surfaces made of crushed rocks of rational granulometric composition. *Rossiia molodaya : collection of materials IX*

all-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation, Kemerovo, April 18–21, 2017. Kemerovo, 2017; 51005. (rus.).

21. Taborskaya O.A. Features of Mezen marl as a soil material, outlook of its application. *Lomono-*

sov scientific readings of students, postgraduates and young scientists. *Proceedings of the conference : conference proceedings. Arkhangelsk, April 15–22, 2017.* Arkhangelsk, 2017; 2072. URL: https://narfu.ru/upload/medialibrary/ac8/SBORNIK_-2017.pdf (rus.).

Received October 15, 2019.

Adopted in a revised form on November 7, 2019.

Approved for publication December 28, 2019.

B I O N O T E S : **Egor I. Korolev** — master student of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; egorkorolev@yahoo.com;

Evgeniya N. Sychkina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; ID RISC: 655291; aspirant123@mail.ru;

Andrey B. Ponomaryov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; ID RISC: 412637; spstf@pstu.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 614.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.72-84

Анализ причин и последствий крупных чрезвычайных ситуаций с целью обеспечения комплексной безопасности зданий и сооружений

В.И. Теличенко, В.М. Ройтман

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

АННОТАЦИЯ

Введение. На строительные объекты на протяжении всего жизненного цикла их существования действуют многочисленные опасности и угрозы техногенного и природного характера. Возникает необходимость обеспечения безопасности этих объектов в условиях разнообразных чрезвычайных ситуаций (ЧС), в том числе комбинированного характера. Специалисты испытывают трудности при решении задач, связанных с обеспечением безопасности объектов в этих условиях. В НИУ МГСУ по инициативе и под руководством проф. В.И. Теличенко проводятся исследования в новом научном направлении — разработка концепции комплексной безопасности в строительстве.

Материалы и методы. Авторы применяют разработанную при их участии концепцию комплексной безопасности в строительстве. На ее основе анализируются знаковые ЧС последних лет (2009–2019 гг.): пожар в ночном клубе «Хромая лошадь»; пожар в ТРЦ «Зимняя вишня», г. Кемерово; взрыв в жилом доме, г. Магнитогорск; пожар в Соборе Парижской Богоматери, г. Париж.

Результаты. Анализ ЧС последних лет позволил выделить их основные причины: грубейшие нарушения требований к системе противопожарной защиты (СПЗ) зданий и сооружений как основы обеспечения комплексной безопасности объектов при ЧС; недостаточный учет технического состояния строительных объектов при оценках их комплексной безопасности с учетом ЧС.

Выводы. Обращается внимание на особую роль зданий и сооружений. Для удобства нормирования и проектирования безопасности строительных объектов предлагается классификация мер СПЗ на четыре блока: меры для обеспечения устойчивости объектов в условиях ЧС; меры для ограничения распространения пожара; меры для обеспечения безопасности людей при ЧС; меры активной защиты объектов при ЧС. Система мер СПЗ может рассматриваться как основа обеспечения комплексной безопасности объектов в условиях ЧС. Показано, что выявленные причины неоправданных человеческих потерь и материального ущерба могли бы быть устранены путем своевременного применения соответствующих мер СПЗ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: концепция, опасность, безопасность, комплексная безопасность, строительство, здание, сооружение, чрезвычайная ситуация, пожар, ущерб

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Теличенко В.И., Ройтман В.М. Анализ причин и последствий крупных чрезвычайных ситуаций с целью обеспечения комплексной безопасности зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 72–84. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.72-84

A cause-and-consequence analysis of serious emergencies with the aim of providing integrated safety of buildings and installations

Valery I. Telichenko, Vladimir M. Roitman

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

ABSTRACT

Introduction. Throughout their entire life cycle, construction projects are under the influence of numerous dangers and threats of technogenic and natural character. It is necessary to provide the safety of these projects in various emergencies, including ones of combined character. When solving problems connected with providing safety of the facilities under these conditions, specialists encounter difficulties. Studies in a new school, developing a concept of integrated safety in construction, are conducted in the National Research University MGSU on the initiative by and under the guidance of Professor V.I. Telichenko.

Materials and methods. The authors apply a concept of integrated safety in construction developed with their participation. The concept serves as the basis for analysis of major emergencies of the last years (2009–2019): the fire in the Lame Horse nightclub, the fire in the Winter Cherry mall at the town of Kemerovo, the explosion in a residential house at the town of Magnitogorsk, the fire in the cathedral Notre-Dame de Paris.

Results. Analysis of the latest emergencies allowed identifying their main causes. Those include gross violations of requirements for a fire protection system (FPS) for buildings and installations as the basis for providing the integrated facility safety in emergencies and insufficient consideration of construction facility technical condition when assessing its integrated safety under emergency conditions.

Conclusions. The paper attracts attention to the FPS of buildings and installations. For the convenience of standardization and designing safety systems of construction projects, the authors suggest to classify FPS measures into four blocks: providing stability of the facilities in emergencies, limiting the spread of fire, providing human safety during the emergency, active protection of the facilities during the emergency. The system of the FPS measures can be considered as the basis for providing integrated safety of the facilities under emergency conditions. The article has shown that the revealed causes of the unwarranted loss of human lives and material damage could be eliminated by means of timely application of the corresponding FPS measures.

KEYWORDS: concept, danger, safety, integrated safety, construction, building, installation, emergency, fire, damage

FOR CITATION: Telichenko V.I., Roitman V.M. A cause-and-consequence analysis of serious emergencies with the aim of providing integrated safety of buildings and installations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):72-84. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.72-84 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Строительные объекты на протяжении всего жизненного цикла их существования подвергаются воздействию многочисленных опасностей и угроз со стороны как внешней среды, так и техногенных факторов. В работах [1–11] были рассмотрены виды возможных источников опасности для различных объектов строительства, не только регламентированных в различных документах, имеющих нормативный статус, но и новых опасностей и угроз, наблюдаемых в последнее время. С учетом разнообразности угроз специалисты испытывают трудности при решении задач, связанных с обеспечением безопасности объектов в этих условиях.

Обеспечение безопасности таких объектов в условиях разнообразных чрезвычайных ситуаций (ЧС), в том числе комбинированного характера [1–2] продиктовало необходимость разработки концепции комплексной безопасности в строительстве [1].

На основе анализа основных признаков, понятий различных видов опасностей, действующих на строительные объекты, авторами концепции сформулирован комплекс определений, характери-

зующих понятие комплексная безопасность в строительстве.

Научные исследования в области обеспечения комплексной безопасности в строительстве^{1, 2, 3, 4, 5} [1–11, 12–23] показывают, что она должна обеспечиваться на различных уровнях: строительство; строительный объект; здание и сооружение, и фактически является одним из критериев качества искусственной сферы обитания человека.

При этом понятие комплексная безопасность в строительстве включает в себя не только обеспечение стандартами безопасности самого объекта, но и обеспечение безопасного влияния объекта на окружающую среду. Комплексная безопасность строительства — неотъемлемая часть глобальной системы безопасности территории, региона, государства, и, даже, континента. Можно привести много примеров, когда ошибки в строительной деятельности приводили к возникновению ЧС и проблемам территорий и регионов.

Цель данной работы — на основе концепции комплексной безопасности в строительстве проанализировать причины и последствия крупных (вызавших тяжелые человеческие жертвы и значи-

¹ СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. 2003. 60 с.

² СТО НОСТРОЙ 2.33.79-2012. Строительные конструкции зданий и сооружений. Обследование ограждающих конструкций зданий и сооружений в натурных условиях и оценка их технического состояния. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ: стандарт организации : утв. и введен в действие решением Совета Национального объединения строителей от 25.10.2012 № 36. М. : Национальное объединение строителей, 2013. 54 с.

³ Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда : Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 15.10.2003 № 5176) // Российская газета. № 214, 23.10.2003 (дополнительный выпуск).

⁴ Техническая оценка зданий и сооружений : метод. указания по решению задач / сост. О.С. Власова. Волгоград : ВолгГАСУ, 2016. 50 с.

⁵ ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25.03.2010 № 37-ст).

тельный материальный ущерб) ЧС последних лет⁶ для их предотвращения и обеспечения комплексной безопасности зданий и сооружений [1–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базируясь на концепции комплексной безопасности в строительстве, проведен анализ знаковых ЧС, произошедших в РФ и за рубежом за последние 10 лет, в следующих категориях:

- нарушение требований противопожарных норм и правил для зданий и сооружений;
- учет технического состояния зданий и сооружений в условиях эксплуатации (реконструкции).

Систематизированы причины возникновения ЧС, факторы, повлиявшие на их исход.

В рамках данного исследования, говоря о комплексной безопасности объекта строительства, мы ограничиваемся объектом высотного строительства, не принимая в расчет объекты промышленного строительства или специального назначения, такие как ТЭС, АЭС, ГС и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пожар в ночном клубе «Хромая лошадь», г. Пермь, 5 декабря 2009 г.

Причиной пожара стал запуск фейерверка во время пиротехнического шоу. Искры от фейерверка попали в декоративный подвесной потолок, выпол-

⁶ Российский эксперт назвал главную сложность при тушении Нотр-Дама. URL: <https://ria.ru/20190416/1552719379.html>

ненный из сухого хвороста, украшенного деталями из пластика (рис. 1). Практически сразу погас свет, что стало одной из причин затруднения организованной эвакуации из помещения. Люди в панике пытались выбраться из заполненной ядовитым дымом ловушки, с потолка на них падали расплавившиеся фрагменты из пластика. Из-за плохой организации эвакуации зал с несколькими сотнями человек превратился в западню: окна в клубе были заложены кирпичом, а выход оказался слишком узким. Была еще одна дверь, но о ней знали только сотрудники заведения.

На момент пожара в клубе собралось ориентировочно 300 человек. Число жертв в клубе — **156 погибших** в основном от поражения органов дыхания токсичными продуктами горения, **78 пострадавших**.

В 2001 г. помещение магазина было переоборудовано в клуб. Согласно Градостроительному кодексу РФ реконструкция существующего здания (магазина) под ночной клуб с массовым пребыванием людей должна была производиться на основе проекта, одним из разделов которого является система противопожарной защиты (СПЗ). Этот проект, в соответствии с требованиями норм, должен был содержать вышеперечисленные меры, отсутствие которых привело к трагедии.

Основное нарушение требований норм к мерам СПЗ — отсутствие противодымной защиты помещения клуба (рис. 2).

Назначение такого элемента СПЗ, как система противодымной защиты, — обеспечить в течение необходимого времени эвакуации людей из поме-



Рис. 1. Зона танцевальной площадки клуба «Хромая лошадь». Хорошо видна конструкция декоративного подвесного потолка из хвороста (фото до пожара)

Fig. 1. Dance site of the Lame Horse nightclub (picture taken before the fire). Note decorative suspended ceiling made from brushwood

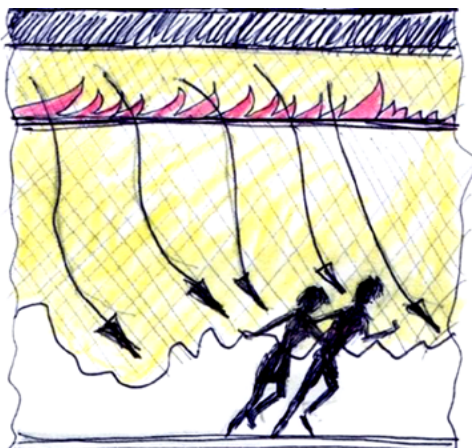


Рис. 2. Основная причина гибели людей при пожаре в ночном клубе «Хромая лошадь» — образование при пожаре под потолком слоя дыма, содержащего токсические продукты горения пластика, и последующее быстрое опускание этого слоя дыма до уровня органов дыхания людей

Fig. 2. The main cause of human death during the fire in the Lame Horse nightclub is the generation of the smoke layer containing toxic products of plastic burning under the ceiling and subsequent fast lowering of this layer to the level of human respiratory apparatus

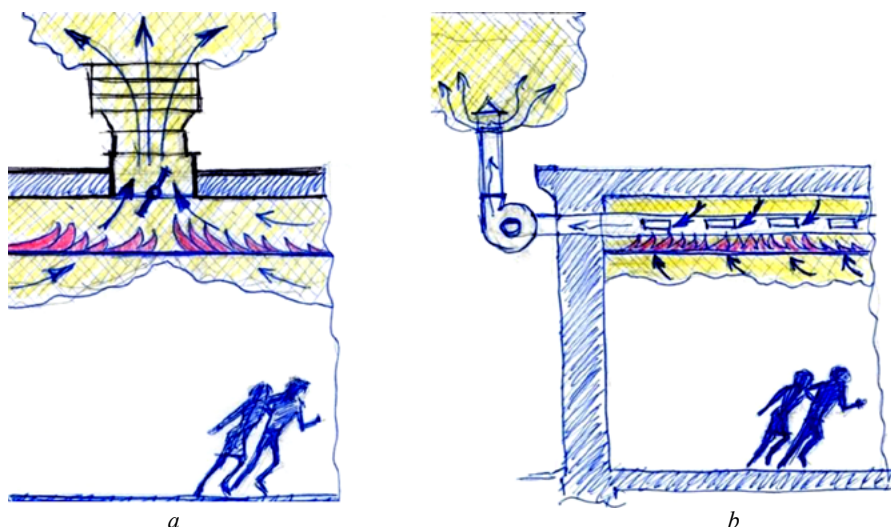


Рис. 3. Варианты устройства противодымной защиты, основанные на устройстве дымовых люков, которые обеспечили бы безопасную эвакуацию людей из клуба при пожаре: *a* — система противодымной защиты в виде «дымового» люка, вытяжного вентилятора, который автоматически включается при срабатывании пожарной сигнализации при возникновении пожара; *b* — система противодымной защиты в виде устройства вытяжной аварийной системы дымоудаления

Fig. 3. Variants of anti-smoke protection based on smoke hatches that would provide safe people evacuation from the club in case of fire: *a* — anti-smoke protection system using “smoke” hatch and ejector fan which turns on automatically when a fire alarm system is activated; *b* — anti-smoke protection system by means of the smoke-removal emergency ejection system

шения исключение попадания дыма и токсичных продуктов горения в органы дыхания людей. Это достигается (рис. 3) путем замедления скорости опускания припотолочного слоя дыма с помощью достаточно простой системы аварийной вентиляции, автоматически срабатывающей от пожарной сигнализации (рис. 3).

Устройство противодымной защиты в ночном клубе «Хромая лошадь» позволило бы избежать человеческих жертв при пожаре.

Таким образом, помещение ночного клуба «Хромая лошадь» эксплуатировалось с грубейшими нарушениями требований пожарной безопасности, в том числе:

- недопустимое использование пожароопасных материалов при оформлении декоративных эле-

ментов помещения клуба с массовым пребыванием людей;

- недопустимое использование фейерверков в помещении клуба с массовым пребыванием людей;
- отсутствие мер по противодымной защите помещения клуба;
- отсутствие системы оповещения и управления эвакуацией людей при ЧС;
- отсутствие пожарной сигнализации;
- отсутствие автоматической системы пожаротушения.

Пожар в здании торгово-развлекательного центра «Зимняя вишня», г. Кемерово, 25–26 марта 2018 г.

Предполагаемые причины пожара: неосторожное обращение с огнем, короткое замыкание

электропроводки и поджог. Большое число жертв было в помещениях кинотеатров (рис. 4). Помещения кинотеатров оборудованы системой кондиционирования воздуха и имели повышенную звукоизоляцию ограждающих конструкций. В результате посетители кинотеатров узнали о пожаре слишком поздно.

Погибло 64 человека, из них 41 — дети, более 50 человек пострадало (рис. 5). Но жертвами пожара стали не только люди, на территории торгово-развлекательного центра (ТРЦ) «Зимняя вишня» находился контактный зоопарк, все питомцы которого (200 животных 25 видов) погибли.

Сложность тушения этого пожара в том, что в развлекательной зоне ТРЦ, на 4-м этаже, были помещения для развлечения детей с повышенным содержанием горючих материалов.

Причина большого количества человеческих жертв в том, что здание ТРЦ «Зимняя вишня» эксплуатировалось с грубейшими нарушениями требований к системе противопожарной защиты, регламентированных для зданий такого типа.

К числу основных нарушений СПЗ здания ТРЦ «Зимняя вишня», которые привели к многочисленным человеческим жертвам относятся:

- в здании ТРЦ размещались помещения различного функционального назначения (торговые, развлекательные, автостоянки и др.);
- для зданий такого типа нормы требуют выделять зоны различного функционального назначения в пожарные отсеки, ограниченные специальными конструкциями — противопожарными преградами.

Противопожарные преграды ограничивают распространение пожара в пределах пожарного отсека в течение необходимого времени для ликвидации ЧС;

- отсутствие деления здания ТРЦ на пожарные отсеки привело к быстрому распространению пожара (и продуктов горения) сверху вниз, с 4-го этажа (место начального очага пожара) на помещения нижележащих этажей. Именно эта причина затрудняла эвакуацию, спасение людей и тушение пожара.

В ТРЦ «Зимняя вишня» не были обеспечены условия для своевременной и безопасной эвакуации людей. Если бы система противопожарной защиты здания ТРЦ «Зимняя вишня» соответствовала требованиям норм, то последствия пожара наверняка были бы не столь тяжелыми.

Взрыв в эксплуатируемом жилом доме, г. Магнитогорск, 2018 г.

В данном разделе рассмотрен случай серьезной ЧС, связанной со взрывом в эксплуатируемом 10-этажном жилом здании 1973 г. постройки. Здание расположено в г. Челябинск по адресу проспект Карла Маркса, д. 164, и представляет собой многоквартирный дом, состоящий из шести двухподъездных блок-секций, всего 12 подъездов. Блок-секции отделены друг от друга температурными швами. В середине дома, в подъездах № 6 и 7, расположен проезд для автотранспорта в виде двойной арки высотой в два этажа. Стены первых двух этажей дома сложены из кирпича, следующих — из стеновых бетонных крупных блоков, перекрытия — из железобетонных плит. В доме имеются три продольные несущие стены (две из которых — наружные).

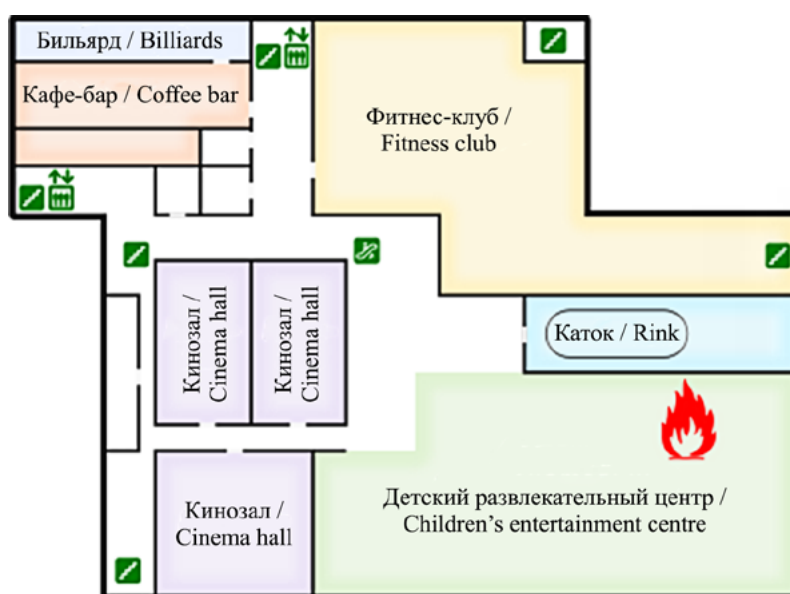


Рис. 4. Схематичный план размещения развлекательных объектов на 4-м этаже ТРЦ «Зимняя вишня»

Fig. 4. Schematic layout of entertainment facilities on the 4th floor of the Winter Cherry mall



Рис. 5. Зона прогрессирующего обрушения строительных конструкций после взрыва в жилом здании в г. Магнитогорск, 31 января 2018 г.

Fig. 5. A zone of the progressing collapse of building structures after an explosion in a residential house at Magnitogorsk on January 31, 2018

Обрушение произошло в подъезде № 7, который вместе с соседним, 8-м подъездом, образует блок-секцию № 4. В частично обрушившемся подъезде № 7 находилось 52 квартиры: по две на первом и втором этажах, по шесть — на следующих. На момент катастрофы в этом подъезде проживали 133 человека.

Взрыв привел к прогрессирующему обрушению конструкций с третьего по десятый этажи в секции здания между подъездами № 6 и 7. Было повреждено 48 квартир, в которых проживало 110 чел. Обломки обрушившихся конструкций образовали завал высотой до третьего–четвертого этажей (рис. 5).

При анализе причин рассматриваемой ЧС возникает вопрос — почему не сработала обычная мера взрывозащиты помещений, в которых происходит взрыв, в виде легкобрасываемых конструкций (ЛСК), их роль играет остекление проемов помещения, в котором произошел взрыв. Эта мера является одним из элементов системы противопожарной защиты.

При возникновении взрыва в помещении, такие предохранительные конструкции вскрываются

при небольших давлениях и обеспечивают последующий сброс продуктов взрывного горения через вскрывшиеся проемы в окружающую среду.

При достаточной площади ЛСК сброс продуктов взрывного горения через вскрывшиеся проемы обеспечивает снижение избыточного давления в помещении, где произошел взрыв, до уровня безопасного для основных несущих конструкций здания.

Особая опасность взрывов для эксплуатируемых строительных объектов состоит в том, что, по мере ухудшения технического состояния конструкций, их несущая способность может снизиться до уровня, когда их разрушение может происходить при давлениях взрыва, соответствующих срабатыванию взрывозащиты (рис. 6).

Пожар в здании Собора Парижской Богоматери, г. Париж (Франция), 15–16 апреля 2019 г.⁶

Пожар в Соборе Парижской Богоматери начался вечером в понедельник. Обрушился шпиль собора, пламенем была объята несущая конструкция. На место ЧС приехали президент и премьер Франции. Около 400 пожарных мобилизованы на тушение пожара.

Развитие пожара в парижском Нотр-Даме объясняется тем, что в базилике шли реставрационные



Рис. 6. Фото разрушений строительных конструкций после взрыва в жилом доме, из которого следует, что прогрессирующее обрушение этой части здания произошло в результате потери несущей способности железобетонных перекрытий. При этом остекление проемов наружных ограждений не выполнило свою функцию как меры взрывозащиты

Fig. 6. A photograph of the building structure breakdown because of an explosion in a residential house. The picture shows that the progressing collapse of this part of the building occurred due to the losing bearing capacity of reinforced concrete floors. At the same time, glazing of outer enclosure openings did not serve as an explosion protection

работы (рис. 7–9). По этой причине здание было окружено строительными лесами.

В последние годы эксперты выявили значительный износ конструкций собора, а также отметили частичное разрушение каменной кладки.

К моменту пожара в апреле 2019 г. на шпилье собора уже велись ремонтные работы.

Рис. 10 свидетельствует о том, что шпиль здания собора со всех сторон был окружен конструкциями строительных лесов, с которых и производились реставрационные работы. Строительные леса — это источник добавочной пожарной нагрузки. Дело в том, что настилы строительных лесов чаще всего сделаны из древесины. Кроме этого, на лесах обычно устраиваются временные склады материалов, которые используются для реставрации (в том числе и горючие материалы, картонная тара, в которой доставляют грузы и пр.).

15 апреля 2019 г. в 18.20 по центрально-европейскому времени в соборе сработала пожарная сигнализация.

В силу аэродинамических особенностей огонь по строительным лесам распространяется очень быстро и такой пожар потушить крайне сложно, учитывая средневековые узкие подъезды⁶.



Рис. 7. Западный фасад здания собора

Fig. 7. Western facade of the cathedral building



Рис. 8. Южный фасад здания собора

Fig. 8. Southern facade of the cathedral building

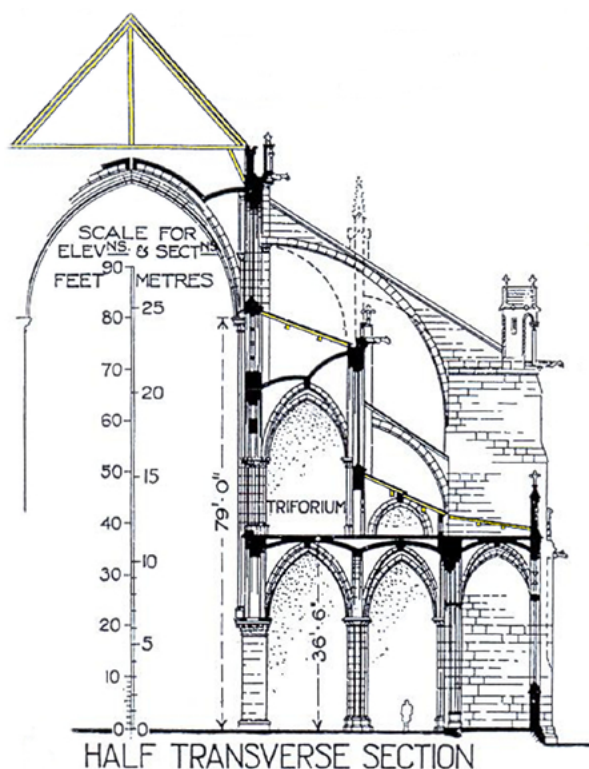


Рис. 9. Поперечный разрез здания собора

Fig. 9. Cross-section of the cathedral building

Если возникает возгорание внизу, то огонь очень быстро, по горючим материалам, находящимся на строительных лесах, распространяется по вертикали. Бороться с такими пожарами чрезвычайно сложно. Пожар продолжает развиваться и это самая главная опасность для уникального здания.

Пожар, скорее всего, произошел из-за нарушения правил пожарной безопасности при проведении реставрационных работ. Помимо этого сложность создает и то, что во время реставрации система противопожарной защиты функционирует недостаточно эффективно.

Что касается восстановления Собора Парижской Богоматери, то, учитывая современный уровень строительной техники, провести такие работы возможно, и это будет сделано. В качестве примера можно привести восстановление московского Манежа после пожара 2004 г.⁶

После анализа фотографий и видео очевидцев следователи сделали вывод, что пожар начался в центральной части крыши, рядом с основанием шпиля (рис. 11).

Парижские пожарные обратили внимание еще на один аспект влияния технического состояния здания собора на его устойчивость после пожара 2019 г. Дело в том, что в июле 2019 г. в Европе (в том числе и во Франции) установилась аномально жаркая погода (порядка 35–40 °C). Это привело к тому, что



Рис. 10. Начало пожара в соборе у основания шпиля

Fig. 10. Beginning of the fire in the cathedral near the spire base

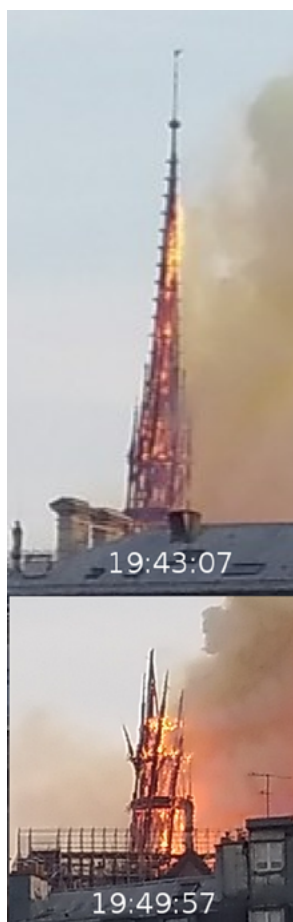


Рис. 11. Горение и разрушение деревянных конструкций шпиля собора при пожаре

Fig. 11. Burning and destruction of cathedral spire wooden structures during the fire

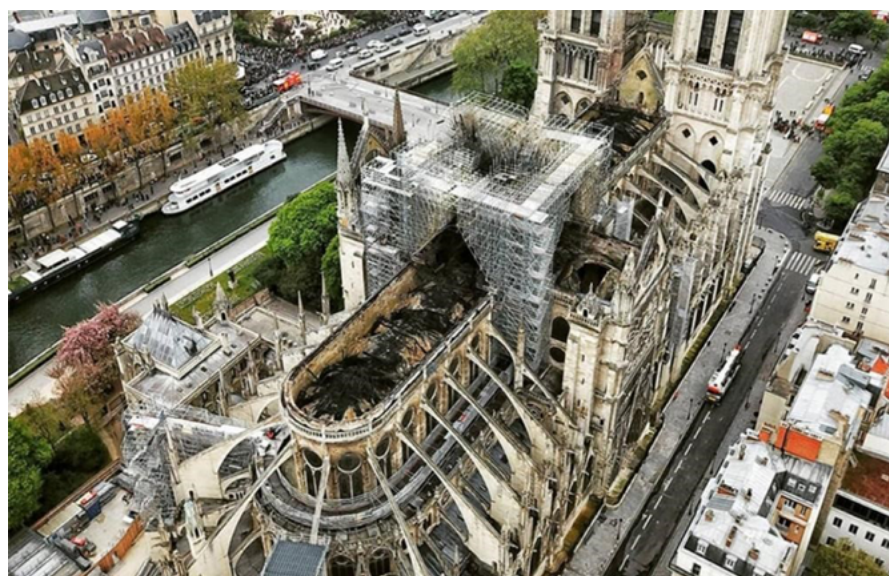


Рис. 12. Разрушение шпиля и прилегающих участков кровли собора (вид собора сверху, после пожара)

Fig. 12. Destroyed spire and adjacent roofing of the cathedral (viewed from above, after the fire)

каменные конструкции собора, оказавшиеся в зоне тушения пожара, при подаче воды оказались переувлажненными (рис. 12).

Известно, что интенсивная сушка во время жаркой погоды переувлажненных каменных конструкций резко интенсифицируют процессы разрушения камня. Этот новый вид опасности после пожара для объектов с высокой степенью износа, находящихся в плохом техническом состоянии, требует отдельного, специального анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассмотренной концепции и анализа знаковых ЧС последних десяти лет выявлены основные причины человеческих жертв и материального ущерба при ЧС на строительных объектах.

Показано, что к основным причинам тяжелых последствий рассмотренных ЧС относятся:

- грубейшие нарушения требований норм к системе противопожарной защиты зданий и сооружений, которая может рассматриваться в качестве основы обеспечения их комплексной безопасности при ЧС;
- недостаточный учет технического состояния эксплуатируемых строительных объектов при оценках их комплексной безопасности с учетом ЧС.

Показано, что выявленные причины неоправданных человеческих потерь и материального ущерба, могли бы быть устранены путем своевременного применения соответствующих мер защиты.

Обеспечение устойчивости эксплуатируемых зданий и сооружений при ЧС является одной из важнейших и сложнейших проблем в области комплексной безопасности этих объектов. Обращается особое внимание на необходимость учета технического состояния зданий и сооружений в условиях эксплуатации (реконструкции), как требуемого аспекта обеспечения их комплексной безопасности при ЧС.

Назрела потребность в очередном реформировании нормативной базы в области обеспечения безопасности в строительстве. Важное место в этом реформировании должен занять перевод ряда сводов правил, регламентирующих меры противопожарной защиты зданий и сооружений, из разряда добровольного применения в разряд обязательных.

Данные о периодических оценках технического состояния строительных объектов должны стать обязательным элементом оценки их безопасности при ЧС.

Следует продолжить исследования в направлении развития общей теории оценки огнестойкости строительных объектов с учетом их технического состояния. Это даст возможность устранить существенную, а в ряде случаев, критическую недооценку опасности ЧС для зданий и сооружений.

Показано, что система противопожарной защиты зданий и сооружений может рассматриваться в качестве основы обеспечения комплексной безопасности этих объектов.

Пристальное внимание стоит обратить на особую роль СПЗ зданий и сооружений. Для удобства нормирования и проектирования безопасности строительных объектов предлагается классификация мер СПЗ на четыре блока:

Блок 1. Меры для обеспечения устойчивости объектов в условиях ЧС.

Блок 2. Меры для ограничения распространения пожара.

Блок 3. Меры для обеспечения безопасности людей при ЧС.

Блок 4. Меры активной защиты объектов при ЧС.

Система мер СПЗ может рассматриваться, как основа обеспечения комплексной безопасности объектов в условиях ЧС. Выявленные причины неоправданных человеческих потерь и материального ущерба, могли бы быть устранены путем своевременного применения соответствующих мер СПЗ.

Современные методы нормирования и проектирования огнестойкости строительных конструкций не позволяют учитывать влияние длительности и условий эксплуатации объектов на их огнестойкость.

Это не соответствует реальному состоянию эксплуатируемых конструкций при пожаре и приводит к недооценке опасности пожара для эксплуатируемых зданий и сооружений.

В литературе имеется большое количество экспериментальных данных о пределах огнестойкости железобетонных балок до начала их эксплуатации.

Данные, полученные в ходе проведенных технических обследований состояния строительных конструкций в условиях эксплуатации, подтверждают, что на протяжении всего срока эксплуатации зданий и сооружений, в строительных конструкциях формируются разного рода повреждения и дефекты, приводящие к снижению их несущей способности — основного параметра, определяющего эксплуатационный предел огнестойкости конструкций.

Общая концепция оценки огнестойкости строительных конструкций с учетом времени и условий эксплуатации содержит понятие о коэффициенте утраты огнестойкости конструкций эксплуатируемых зданий, в зависимости от времени и условий эксплуатации. Использование этого показателя представляется полезным для разработки классификации категорий технического состояния конструкций с учетом значений коэффициента утраты их огнестойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теличенко В.И. Комплексная безопасность строительства // Вестник МГСУ. 2010. № 4–1. С. 10–17.
2. Теличенко В.И., Ройтман В.М., Слесарев М.Ю., Щербина Е.В. Основы комплексной безопасности строительства : мон. М. : Изд-во АСВ, 2011. 168 с.
3. Теличенко В.И., Ройтман В.М. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара — базовый элемент системы комплексной безопасности // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. М., 2010. Вып. 9. С. 15–29.
4. Теличенко В.И., Тетерин И.М., Ройтман В.М., Серков Б.Б. Культура безопасности — точка опоры стратегии обеспечения безопасности объектов жизнедеятельности // Культура безопасности в современном мире : мат. междисциплинарной науч.-практ. конф. с междунар. участием. М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. С. 69–74.
5. Теличенко В.И., Потапов А.Д., Слесарев М.Ю., Щербина Е.В. Экологическая безопасность строительства. М. : Архитектура-С, 2009. 312 с.
6. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю., Стойков В.Ф. Управление экологической безопасностью строительства. Экологический мониторинг : уч. пос. для студентов вузов. М. : Изд-во АСВ, 2005. 328 с.
7. Теличенко В.И. Управление качеством строительной продукции: Техническое регулирование безопасности и качества в строительстве : уч. пос. для студентов вузов. М. : Изд-во АСВ, 2003. 512 с.
8. Теличенко В.И., Малыха Г.Г., Павлов А.С. Воздействие строительных объектов на окружающую среду. М. : Архитектура-С, 2009. 263 с.
9. Теличенко В.И., Бенуж А.А. Обзор и классификация рейтинговых систем сертификации зданий и сооружений // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и Архитектура. 2013. № 31–1 (50). С. 239–243.
10. Теличенко В.И., Бенуж А.А. Совершенствование принципов устойчивого развития на основе опыта применения «зеленых» стандартов при строительстве Олимпийских объектов в Сочи // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 40–43.
11. Telichenko V., Benuzh A. Selection of the most appropriate and energy-efficient scheme for Russia between BREEAM and LEED // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1065–1069. Pp. 2169–2172. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.2169
12. Ройтман В.М. Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1985. 412 с.
13. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
14. Roytman V.V., Pasman H.J., Lukashevich I.E. The concept of evaluation of building resistance against combined hazardous effects “Impact-Explosion-Fire” after Aircraft Crash // Fire and Explosion Hazards: Proceedings of the Fourth International Seminar, Londonderry, NI, UK, 2003. Pp. 283–293.
15. Ройтман В.М. Основы пожарной безопасности высотных зданий : уч. пос. М. : МГСУ, 2009. 99 с.
16. Ройтман В.М., Серков Б.Б., Шевкуненко Ю.Г., Сивенков А.Б., Барина Е.Л., Приступок Д.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: уч. / под общ. ред. В.М. Ройтмана. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 366 с.
17. Ройтман В.М. О механизме прогрессирующего обрушения высотного здания ВТЦ-7 во время событий 11 сентября 2001 года в Нью-Йорке // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 10. С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.37-44
18. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. СПб. : Издательский Дом KN+, 2001. 140 с.
19. Добромислов А.Н. Диагностика поврежденных зданий и инженерных сооружений. М. : Изд-во АСВ, 2006. 256 с.
20. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : в 2-х ч. Ч. 1. Оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : уч. пос. / под ред. А.И. Бедова. М. : Изд-во АСВ, 2014. 703 с.
21. Афанасьев А.А., Матвеев Е.П. Реконструкция жилых зданий. Часть I. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий. М., 2008. 234 с.
22. Старишко И.Н. Влияние условий эксплуатации на несущую способность железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 1. С. 49–51.
23. Mohsen A.S., Mohammad A.B., Mohammad G.B. Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure // Advances in Structural Engineering. 2016. Vol. 19. Issue 6. Pp. 897–907. DOI: 10.1177/1369433216630367

Поступила в редакцию 7 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 12 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерий Иванович Теличенко** — доктор технических наук, профессор, президент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 449402; ORCID: 0000-0001-7669-713X, Scopus: 6506608557; President@mgsu.ru;

Владимир Миронович Ройтман — доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 585005; RoytmanVM@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Telichenko V.I. Complex safety of building. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-1:10-17. (rus.).
2. Telichenko V.I., Roitman V.M., Slesarev M. Yu., Scherbina E.V. *The basics of integrated construction safety : monograph*. Moscow, Publ. DIA, 2011; 168. (rus.).
3. Telichenko V.I., Roytman V.M. Assurance of resistance of buildings and structures to special complex impacts inclusive of fires as the basic element of the system of comprehensive safety. Improvement of safety of buildings and structures in the course of construction and maintenance. *Building Accident Prevention: A Collection of Scientific Papers*. Moscow, 2010; 9:15-29. (rus.).
4. Telichenko V.I., Teterin I.M., Roitman V.M., Serkov B.B. Safety culture is the fulcrum of the strategy for ensuring the safety of life facilities. *Safety Culture in the Modern World. Materials of an interdisciplinary scientific and practical conference with international participation*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2013; 69-74. (rus.).
5. Telichenko V.I., Potapov A.D., Slesarev M. Yu., Shcherbina E.V. *Ecological safety of construction*. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2009; 312. (rus.).
6. Telichenko V.I., Slesarev M. Yu., Stoykov V.F. *Environmental management of construction. Environmental monitoring: a textbook for university students*. Moscow, ASV Publ., 2005; 328. (rus.).
7. Telichenko V.I. *Quality management of construction products: Technical regulation of safety and quality in construction: a textbook for university students*. Moscow, ASV Publ., 2003; 512. (rus.).
8. Telichenko V.I., Malykha G.G., Pavlov A.S. *The environmental impact of construction projects*. Moscow, Architecture-S Publ., 2009; 263. (rus.).
9. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Review and classification of rating systems for certification of buildings and structures. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2013; 31-1(50):239-243. (rus.).
10. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Improving the principles of sustainable development on the basis of experience of “green” standards application in the construction of Olympic facilities in Sochi. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 10:40-43. (rus.).
11. Telichenko V., Benuzh A. Selection of the most appropriate and energy-efficient scheme for Russia between BREEAM and LEED. *Advanced Materials Research*. 2014; 1065-1069:2169-2172. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.2169
12. Roitman V.M. *Fire resistance assessment of building structures on the basis of kinetic ideas about the behavior of materials in fire conditions : dissertation of Dr. tech. sciences*. Moscow, 1985; 412. (rus.).
13. Roitman V.M. *Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings*. Moscow, Fire Safety and Science Association Publ., 2001; 382. (rus.).
14. Roitman V.V., Pasman H.J., Lukashevich I.E. The concept of evaluation of building resistance against combined hazardous effects “Impact-Explosion-Fire” after Aircraft Crash. *Fire and Explosion Hazards: Proceedings of the Fourth International Seminar, Londonderry, NI, UK*. 2003; 283-293.
15. Roitman V.M. *Fundamentals of fire safety of high-rise buildings*. Moscow, MGSU Publ., 2009; 99. (rus.).
16. Roitman V.M., Serkov B.B., Shevkunenko Yu.G., Sivenkov A.B., Barinova E.L., Prystupuk D.N. *Buildings, structures and their resistance to fire: textbook*. Ed. by V.M. Roitman. 2nd ed., revised and suppl. rev. Moscow, Academy of state fire service of EMERCOM of Russia, 2012; 366. (rus.).
17. Roitman V.M. On the mechanism of progressive collapse of the high-rise building WTC-7 during events of 11 September 2001 in New-York. *Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(10):37-44. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.37-44 (rus.).

18. Grozdov V.T. *Technical inspection of building structures of buildings and co-weapons*. St. Petersburg, Publishing House KN +, 2001; 140. (rus.).
19. Dobromyslov A.N. *Diagnosis of damage to buildings and engineering structures*. Moscow, ASV Publ., 2006; 256. (rus.).
20. Bedov A.I., Znamensky V.V., Gabitov A.I. *Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of the foundations and building structures of operated buildings and structures. In 2 parts. Part 1. Assessment of the technical condition of foundations and building structures of operated buildings and structures : textbook*. Ed. A.I. Bedova. Moscow, ASV Publ., 2014; 703. (rus.).
21. Afanasyev A.A., Matveev E.P. *Reconstruction of residential buildings. Part I. Technologies for restoring the operational reliability of residential buildings*. Moscow, 2008; 234. (rus.).
22. Starishko I.N. Influence of exploitative conditions on the carrying capacity of reinforced concrete construction in normal and inclined section. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 1:49-51. (rus.).
23. Mohsen A.S., Mohammad A.B., Mohammad G.B. Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure. *Advances in Structural Engineering*. 2016; 19(6):897-907. DOI: 10.1177/1369433216630367

Received October 7, 2019.

Adopted in a revised form on November 12, 2019.

Approved for publication December 29, 2019.

B I O N O T E S : **Valery I. Telichenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, President; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 449402; ORCID: 0000-0001-7669-713X, Scopus: 6506608557; President@mgsu.ru;

Vladimir M. Roitman — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 585005; RoitmanVM@mgsu.ru.

Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea

Anghesom A. Ghebrehiwot¹, Dmitry V. Kozlov²

¹ *Hamelmallo Agricultural College, National Higher Education and Research Institute; Keren, Eritrea;*

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

ABSTRACT

Introduction. Global reanalysis products are extensively used for hydrologic applications in sparse data regions. The establishment of inputs for hydrologic modelling from such global reanalysis requires prior checking and analyses.

Materials and methods. The present study attempts to utilize Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) datasets for the Mereb-Gash river basin in Eritrea, to prepare the input data for forthcoming hydrological modelling studies. The activities include statistical analyses, computation of PET, and drought indices using different methods so as to understand basin characteristics through the use of geospatial and geostatistical tools.

Results. The results of statistical analyses indicated that there was predominantly a significant monotonic trend in the majority of the data. Precipitation (P) and relative humidity tend to decrease, whereas temperature (T) and potential evapotranspiration (PET) tend to increase. Among the PET estimation methods, the Thornthwaite method gave inconsistent results as compared to Hargreaves and Penman-Monteith methods, the former being highly dependent on the elevation of the station. In most cases, it was found that Penman-Monteith produced the highest PET values.

Conclusions. Besides, Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) analyses in the basin indicate persistent dry conditions over the period 2000–2013 and predominantly humid conditions over the period 1979–2000. The study concluded that the presence of a significant trend in most of the climatic variables and persistent drought conditions in recent years were found to be congruent with global and regional climatic studies that are highly likely linked to human and climate influence on the environment.

KEYWORDS: global reanalysis, potential evapotranspiration, standardized precipitation and evapotranspiration index, Mereb-Gash river basin

FOR CITATION: Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):85-99. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.85-99 (rus.).

Статистическая и пространственная изменчивость климатических данных в бассейне реки Марек-Гаш в Эритрее

А.А. Гебрехиwот¹, Д.В. Козлов²

¹ *Аграрный колледж Хамелмало, Национальный институт высшего образования и исследований;
Кэрэн, Государство Эритрея;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Продукты глобального реанализа имеют широкое применение в гидрологии при недостаточности исходных данных. Формирование исходной информации для гидрологического моделирования на основе такого глобального реанализа требует предварительной проверки и анализа.

Материалы и методы. Предпринята попытка использовать массивы данных реанализа системы климатических прогнозов (CFSR) для условий бассейна реки Марек-Гаш в Эритрее с целью подготовки исходных данных для предстоящих исследований в области гидрологического моделирования. Это исследование включило в себя статистический анализ, расчет индексов потенциальной эвапотранспирации (ПЭТ) и засухи на основе применения различных методов с целью изучения характеристик речного бассейна с использованием геопространственных и геостатистических инструментов.

Результаты. Результаты статистического анализа показали, что в большинстве массивов данных в значительной степени преобладают монотонные тенденции: осадки (P) и относительная влажность имеют тенденцию к уменьшению, тогда как температура воздуха (T) и ПЭТ — тенденцию к увеличению. Среди методов оценки ПЭТ метод Торнтюэйта

дал неоднозначные результаты по сравнению с методами Харгривза и Пенмана-Монтейта, причем использование первого метода сильно зависело от высотного положения метеостанции. В большинстве случаев было обнаружено, что по методу Пенмана-Монтейта получались самые большие значения ПЭТ.

Выводы. Анализ стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (SPEI) по методу Пенмана-Монтейта в исследуемом речном бассейне указал на устойчивые засушливые условия в период с 2000 по 2013 г. и преимущественно влажные условия в период с 1979 по 2000 г. Сделан вывод о том, что имеющиеся тенденции для большинства климатических характеристик и устойчивого развития условий засухи в последние годы хорошо согласуются с результатами глобальных и региональных климатических исследований, и, по всей вероятности, связаны с влиянием на окружающую среду воздействия человека и изменения климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глобальный реанализ, потенциальная эвапотранспирация, стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации, бассейн реки Мереб-Гаш

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гебрехиwот А.А., Козлов Д.В. Статистическая и пространственная изменчивость климатических данных в бассейне реки Мареб-Гаш в Эритрее // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 85–99. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.85-99

INTRODUCTION

In any hydrological modelling process that intends to make predictions from ungauged catchments, three types of data are needed: runoff data, climatic data, and basin characteristics. The most widely used models that make use of such data include statistical, process-based or a combination, of both [1]. Hence, runoff Predictions for Ungauged Basins (PUB) (e.g., [2, 3]) recommended the assessment of available data and the information that can be obtained from such data to be the starting point in any hydrological studies. Different data sources for runoff PUB are available: global, local, and regional data sources followed by field observations [4]. If the resources are available, the most accurate runoff predictions can be obtained by utilising very local data describing the specific characteristics and behaviour of the system. While global or regional data can be useful for annual runoff prediction, more intensive local data can be needed for hydrograph prediction [1].

So far, limited hydrological studies have been carried out in the Mereb-Gash river basin in Eritrea. These limited studies (e.g.¹, [5–8]) have sought to understand the hydrology of the area. Others (e.g., [9, 10]) have assessed the environmental repercussions due to flooding and possible mitigation mechanisms at the outlet of the basin. These modelling efforts have ranged from simple conceptual models to complex, physically-based distributed hydrological models. One of the main challenges highlighted in all these studies is the acute shortage of historical hydrometeorological data, suggestions for improved data collection and management system to increase the reliability of hydrological modelling efforts. Global reanalysis products are extensively used

for hydrologic applications in sparse data regions (e.g., [11–15]). For example, [14] evaluated ERA-5, CFSR, ERA-Interim, Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA), and Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) for stream flow and annual water budget for two basins located in the diverse climatic settings in India. The results showed that these reanalysis products yielded satisfactory performance. Likewise, [15] evaluated three widely used global high-resolution precipitation products, namely Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record (PERSIANN-CDR), Tropical Rainfall Measuring Mission 3B42 Version 7 (TRMM 3B42V7), and CFSR against gauge observations and investigated their reliability as inputs in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to simulate streamflows. Results showed the potentiality of PERSIANN-CDR and 3B42V7 for streamflow prediction on at daily and monthly scale, respectively, over the two humid regions. At the same time, the performance of NCEP-CFSR for hydrological applications varies from basin to basin [11, 13, 16] used CFSR data for hydrological modelling in tropical and semi-tropical basins. The spatially interpolated CFSR data performed as well or better than single ground observations made further than 20–30 km, and sometimes better than individual weather stations less than 10 km from the basin centroid. This study further revealed the usefulness of CFSR data as a means to supplement ground records and consistently determine a baseline for hydrologic model performance. Fuka and others [13] used the CFSR to obtain historical weather data. They demonstrated its application to modelling five watersheds representing different hydroclimatic regimes in Ethiopia and the United States of America. Moreover, [16] assessed the applicability of CFSR climate data in model-

¹ Euroconsult. Sector study on national water resources and irrigation potential: component 1 report surface water resources. Arnhem, Netherlands, 1998.

ling the hydrology of the Upper Blue Nile, Ethiopia. Results reveal that utilizing the CFSR precipitation and temperature data to force a watershed model provides stream discharge simulations that are as good as or better than models forced using conventional weather stations.

The satellite-based global CFSR climatic dataset for the period 1979–2013 on a daily basis might be used for hydrologic modelling to predict streamflow from the poorly gauged Mereb-Gash river basin. However, prior to usage of the global climatic datasets as input to hydrological modelling, various statistical processes should be undertaken the fact that this is the first attempt to utilize global climatic data for the aforementioned purpose in the study area. Such activities are essential to understand the human and climate variability impact on the environment under the influence of natural fluctuations in temperature, precipitation, and other factors. In this regard, the non-parametric Mann-Kendall (MK) and Sen's Slope (SS) estimator are used to estimate the magnitude of the trend for the reference time series of 32 global satellite-based stations. Moreover, the determination of PET and other variables and parameters are inevitable procedures, because they are not only inputs to hydrological modelling but also help to understand the basin characteristics. Therefore, the present study focuses on the statistical analyses, computation of PET and drought indices using different methods. In addition, analyses of spatio-temporal variability and distribution of various climatic parameters and

variables would be carried out, aiming at understanding basin characteristics. The authors strongly believe that this study will contribute to future hydrologic modelling studies in the area.

METHODS AND MATERIALS

Study area

Water resources of Eritrea are divided into five major river basin systems: Mereb-Gash, Barka-Anseba, Danakil, Setit, and the Red Sea. The Mereb-Gash river basin, originating from the Eritrean highlands and the Ethiopian plateau, is a transboundary river basin that crosses two political borders; Ethiopia and Sudan. It is known by Mereb and Gash in the upstream and downstream areas, respectively; hence the name Mereb-Gash that represents the whole basin is commonly used. Figure 1 shows the geographical location of the Mereb-Gash river basin. Its outlet is at Kassalatown (Sudan), which is located at 36°23'20" E longitude and 15°26'50" N latitude, having an area and main channel length of 22,900 km² and 500 km, respectively. According to Euroconsult¹, out of the total area 17,400 km² lies in the Eritrean territory. It is a long, narrow basin, having a basin shape factor and average basin slope of 11 and 7 %, respectively. The flow of the Mereb-Gash does not usually reach the Nile River; rather, it is lost in the sands of the eastern plains of Sudan. Even though the river basin has limited streamflow data, it is believed to be one of the basins with the highest potential for

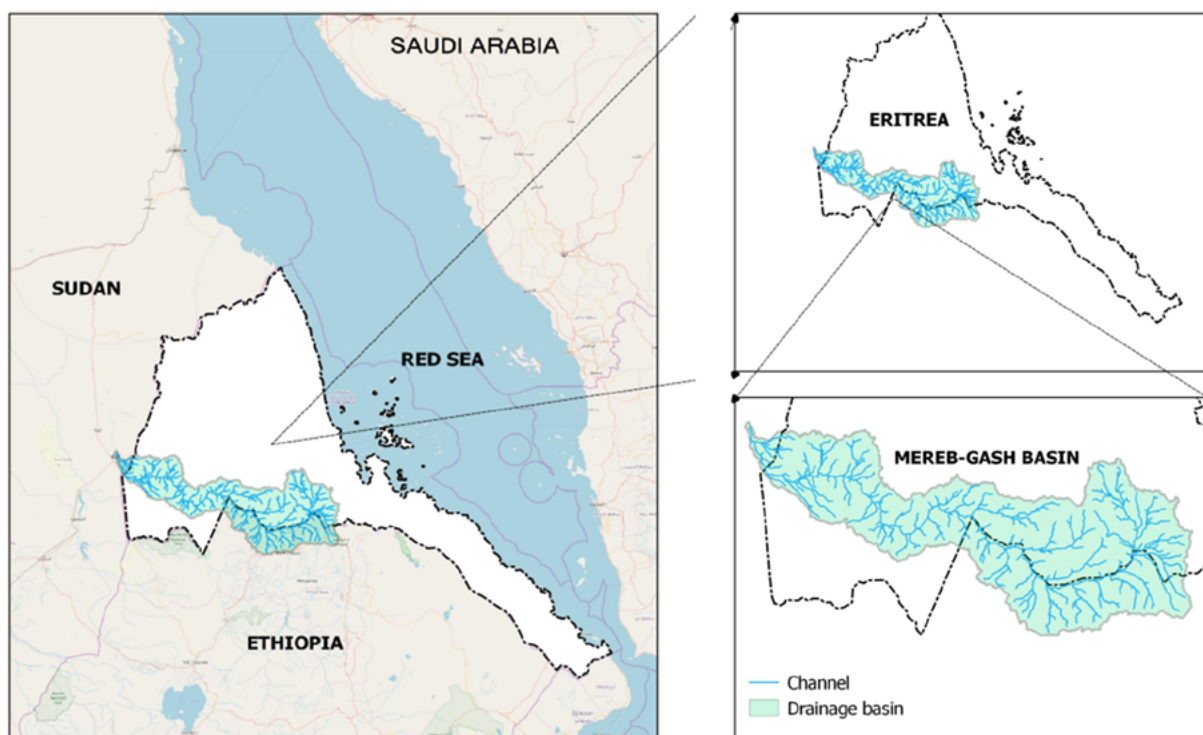


Fig. 1. Geographical location of the study area

modern technology-based irrigation that can provide sustainable agricultural development in the region.

The river flow has high variation during the wet season. The mean annual flow is estimated to be 680 million m³ [9] and maximum flow 1,000 m³s⁻¹ [10]. It is dry for much of the year (November-April) but subjected to flash floods, transporting 40 million m³ of sediment [10] during the rainy season. The rainy season usually starts in June and ends in September with a series of flood flows. The flash floods are mainly due to mountainous and dissected topography of the upper-third and partly the middle-third of the basin, poor vegetation cover, unfavourable geological formations which are associated with poor soil formation and low infiltration rates. The downstream plains in the lower-third of the basin have been experiencing recurrent flooding; for example [9, 10] reported that the recurrence interval of severe floods for Kassala town is 1 to 5 years. Likewise, the western plain areas, e.g., the town of Tesseney, had been repeatedly exposed to flooding [17]. The long-term annual rainfall in the area is highly variable, usually ranging from over 900 mm to less than 300 mm [18]. The temperature in the area is also highly variable that depends on the season of the year; it is the highest in April and May and lowers in December and January. Typically minimum and maximum temperatures range from less than 10 °C in the highlands to more than 45 °C in the lowlands.

Data sources

Climatic data, which are available globally at 38 km resolution, were obtained from the CFSR over a 35 years period (1979–2013) on a daily basis. These datasets include precipitation (P), minimum and maximum temperatures, wind speed, relative humidity, and solar radiation. Moreover, a high-resolution digital elevation dataset for the study area was acquired from The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) at 1 arc-second global resolution. The spatio-temporal analyses were done with the help of the Quantum Geographic Information System (QGIS).

Data analyses

Non-parametric monotonic trendtest

To test the CFSR dataset for monotonic trend, MK and SS are employed in this study. Non-parametric MK test is commonly employed to detect monotonic trends in a series of environmental, climatic, or hydrological data. The MK trend test assumes that under the null hypothesis of no trend, the time series is independent and identically distributed. The null hypothesis H_0 is that the data come from a population with independent realizations and are identically distributed. The alternative hypothesis H_A is that the data follow a monotonic trend. The univariate MK for a monotone trend in a time series $(X_j, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ of data is based on the test statistic S defined as follows:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(X_j - X_k), \quad (1)$$

where X_j are the sequential data values, n the length of the data set, and

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0, \\ 0 & \text{if } x = 0, \\ -1 & \text{if } x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Mann [18] and Kendall [19] have documented that when $n \geq 8$, S is approximately normally distributed with mean, $E(S) = 0$ and variance σ^2 given by

$$\sigma^2 = \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right\} / 18, \quad (3)$$

where p is the number of the ties of the extent i and t_j is the number of data points in the j^{th} tied group. The statistic S is approximately normally distributed, provided that the following Z-transformation is employed:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{if } S > 0, \\ 0 & \text{if } S = 0, \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{if } S < 0. \end{cases} \quad (4)$$

S is closely related to Kendall's τ as given by:

$$\tau = \frac{S}{D}, \quad (5)$$

where

$$D = \left[\frac{1}{2}(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{1/2} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

The magnitude of the slope of trend proposed by Sen [19] is estimated by:

$$b = \operatorname{Median} \left(\frac{x_j - x_l}{j - l} \right), \quad \forall l < j, \quad (7)$$

where b is the estimate of the slope of trend and x_j is the j^{th} observation. The slope determined by equation (7) is a robust estimate of the magnitude of the monotonic trend. Negative values indicate a decreasing trend, 0 values no trend, and positive values indicate an increasing trend.

Potential evapotranspiration (PET)

There are several temperatures and radiation-based formulae for calculating PET, such as Blaney-Criddle, Turc, Penman-Monteith, Thornthwaite, Hargreaves, and so on. Three of these methods, which are built-in in the "SPEI" package in R-programming language that uses user-selected input data, have been selected for the determination of PET. The first method computes the monthly PET according to the Thornthwaite [20] equation. It is the simplest of the three methods and can be used when only temperature data are available. But, variables that can affect PET, such as wind speed, surface humidity, and solar radiation, are not account-

ed for. In cases where more data are available, a more advanced method to calculate PET is often preferred to make a more complete accounting of drought variability. However, these additional variables can have significant uncertainties. The second method uses the Hargreaves [21] equation that computes the monthly reference evapotranspiration ET_0 of a grass crop. This method requires data on the mean external radiation. If such data are not available, it can be estimated from the latitude and the month of the year. The third method calculates the monthly reference evapotranspiration ET_0 of a hypothetical reference crop according to the FAO-56 Penman-Monteith equation described in [22]. The original parameterization of Allen et al. [22] is used, corresponding to a short reference crop of 0.12 m height. The method requires data on the incoming solar radiation or sunshine hours or cloud cover, relative humidity, minimum and maximum temperature, wind speed, and geographical information.

Drought characterization

A drought is a natural phenomenon that occurs over a variable period as a result of prolonged shortages in the water supply². It can have a substantial impact on many economic sectors and people. Drought indicators or indices are often used to help monitor droughts. According to World Meteorological Organization (WMO)², there are numerous types of drought indicators and indices; Aridity Anomaly Index (AAI), Aridity Index (AI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Standardized Precipitation Index (SPI), Rainfall Anomaly Index (RAI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) are some among others. A list of such methods, along with their strengths and limitations, is presented in². To assess the degree of droughts in the study area, SPEI based on 32 global satellite-based stations, within and around the Mareb-Gash basin, have been considered. The spatial and temporal comparisons of droughts are prepared by analysing the historical droughts by the characteristics of duration, severity, and magnitude.

The SPEI, a climate drought index which was proposed by [23] and modified by [24], was designed to take into account both precipitation and potential evapotranspiration (PET) in determining drought on a range of timescales. SPEI uses the basis of SPI [25] but includes a temperature component, allowing the index to account for the effect of temperature on drought development through a basic water balance calculation. Vicente-Serrano and others [23] showed that SPEI has the advantage of combining multi-scalar character with the capacity to include the effects of temperature

variability on drought assessment. Ever since its development, SPEI has been used in an increasing number of climatologic and hydrologic studies [24] based on 30–50 years climatic database.

SPEI uses the monthly (or weekly) difference between precipitation and PET. This represents a simple climatic water balance, which is calculated at different time scales to obtain the SPEI. For given values of P_i and PET_i , the climatic water balance D_i that provides a simple measure of the water surplus or deficit for the analysed month is calculated as:

$$D_i = P_i - PET_i, \quad (8)$$

The calculated D_i values could be aggregated at different time scales using the same procedure as that of SPI [23]. The probability density function of a three-parameter log-logistic distributed variable is given by:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2}, \quad (9)$$

where α , β , and γ are scale, shape and origin parameters, respectively, for D values in the range ($\gamma > D < \infty$).

Parameters of the log-logistic distribution can be obtained following different procedures. The L -moment procedure is the most robust and easy approach [26]. When L -moments are calculated, the parameters of the log-logistic distribution are given by [27] as follows:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)}, \quad (11)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right), \quad (12)$$

where $\Gamma(\beta)$ is the gamma function of β .

In Vicente – Serrano and others [23], when the log-logistic α , β , and γ distribution parameters were calculated, the probability-weighted moments (PWMs) method is used, based on the plotting-position approach [28], where the PWMs of orders are calculated as:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1-F_i)^s D_i, \quad (13a)$$

where F_i is a frequency estimator following the approach of Hosking [28]:

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N}, \quad (13b)$$

where i is the range of observations arranged in increasing order and N is the number of data, and D_i is the difference between precipitation and potential evapo-

² WMO and GWP, *Integrated Drought Management Programme Handbook of Drought Indicators and Indices*. 2016; 1173.

transpiration for the month i . The unbiased PWMs are obtained according to:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{N-i}{s} \right) / \left(\frac{N-1}{s} \right) \right]. \quad (14)$$

The probability distribution function of D according to the log-logistic distribution is then given by:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right]^{-1}. \quad (15)$$

With $F(x)$ the SPEI can easily be obtained as the standardized values of $F(x)$ as given in Vicente – Serrano [23]:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, \quad (16)$$

where

$$W = \sqrt{-2 \ln(p)} \text{ for } p \leq 0.5 \quad (17)$$

p is the probability of exceeding a determined D value, $p = 1 - F(x)$. If $p \geq 0.5$, p is replaced by $1 - p$ and the sign of the resultant SPEI is reversed, $C_0 = 2.525517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 0.432788$, $d_2 = 0.189269$ and $d_3 = 0.0011308$. SPEI has an intensity scale in which both positive and negative values are calculated, identifying wet and dry events (Table 1). The average value of the SPEI is 0, and the standard deviation is 1. SPEI of 0 indicates a value corresponding to 50 % of the cumulative probability of D , according to a log-logistic distribution.

Table 1. SPEI classification of dry and wet conditions

Category	SPEI	Probability, %
Extreme wet	$SPEI \geq 2.0$	2.3
Severe wet	$1.5 \leq SPEI < 2.0$	4.4
Moderate wet	$1.0 \leq SPEI < 1.5$	9.2
Normal	$-1.0 < SPEI < 1.0$	68.2
Moderate dry	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$	9.2
Severe dry	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$	4.4
Extreme dry	$SPEI \leq -2.0$	2.3

RESULTS AND DISCUSSION

Precipitation data of 35 years on a daily basis from CFSR has been processed to find out the monthly, seasonally, and annual variability by using non-parametric statistical analyses. Fig. 2 shows the spatial variability of the long-term annual rainfall for the Mereb-Gash basin. It can be observed that rainfall is highly variable that comply with^{3,4}, ranging from over 1,100 mm in the upper-third to less than 500–700 mm in the lower-third and middle-third of the basin. A small area within the territory of the basin, which is located at the remotest part in the Ethiopian-Eritrean highlands, receives the highest rainfall. Visual comparison of the annual rain-

³ INC, Eritrea: Initial national communication, Asmara, Eritrea, 2001.

⁴ IWRM, Action Plan for Integrated Water Resources Management (IWRM) in Eritrea, Asmara, Eritrea, 2008.

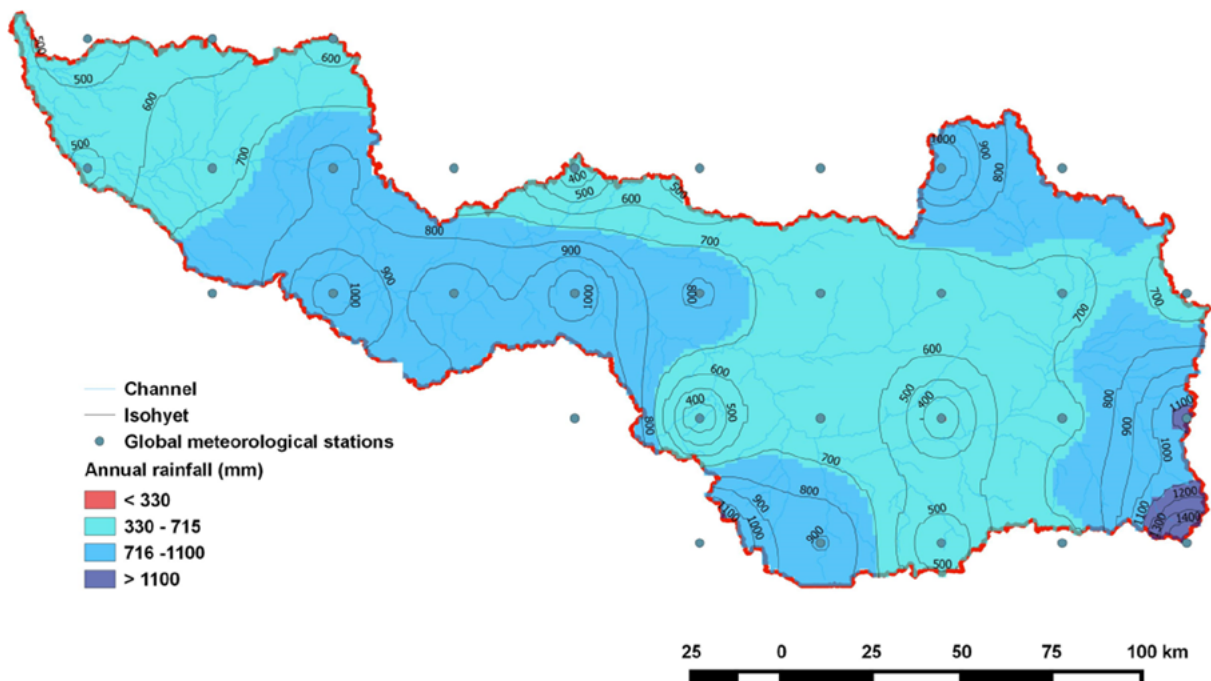


Fig. 2. Spatial variability of long-term rainfall based on CFSR dataset for Mereb-Gash

fall from CFSR data with the one presented in various documents (e.g.³, [30]) shows that the former gives higher precipitation values. Substantial areas in the upper-third and lower-third receive rainfall, ranging from 330–715 mm. Fig. 3, *a* shows the seasonal cycle of the mean monthly rainfall at selected global station near the Gherset dam. The seasonal cycle of monthly rainfall of all the stations is about the same except for variability in magnitude; rainfall is peak during the rainy (summer) season, in the month of either July or August. Fig. 3, *b*, *c*, and *d*) shows linear regression trend analyses of long-term annual relative humidity, precipitation, and maximum temperature, respectively, for the selected station near the Gherset dam. The relative humidity and precipitation regression analyses indicate a decreasing trend, whereas maximum temperature shows an increasing

trend. Similar trends were observed in almost all the other global satellite-based stations.

MK and Sen's slope (SS) monotonic trend analysis methods are applied to long-term annual precipitation (P), temperature (T), and PET to P ratio, as shown in Table 2. MK's p-values of P, T and PET/P are higher than the significance level ($\alpha = 0.05$) at 95 % confidence interval for 34.4, 37.5 and 31.3 % of the stations, respectively. Hence the null hypothesis of no significant monotonic trend in the series is accepted. On the contrary, the p-value of P, T and PET/P are less than the significance level ($\alpha = 0.05$) at 95 % confidence interval for 65.6, 62.5 and 68.7 % of the stations, respectively; hence, the alternative hypothesis of the presence of significant monotonic trend is true. Moreover, SS results of P of all the stations are less than 0 at a 95 % confidence

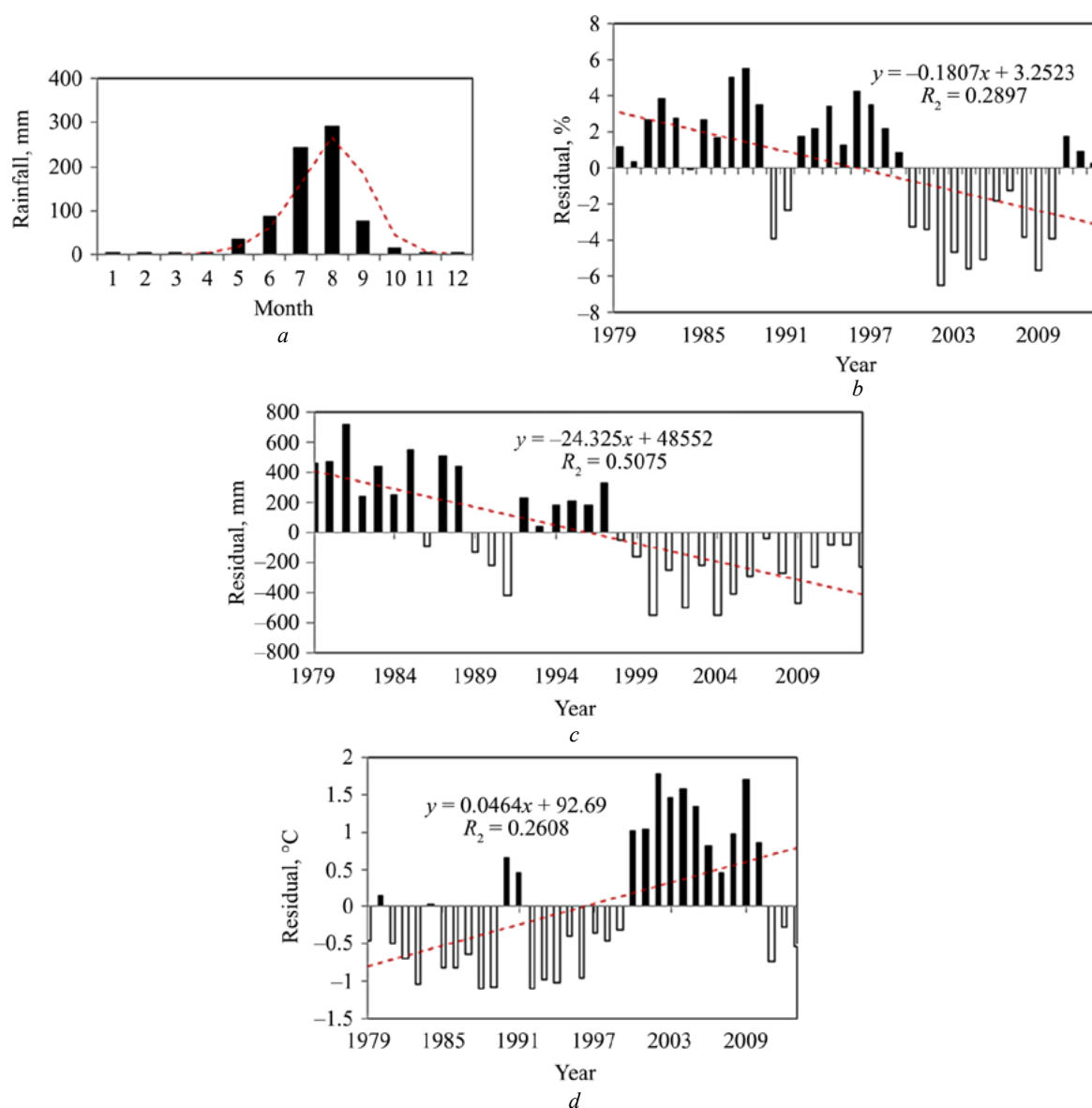


Fig. 3. Regression analyses on long-term climatic data of a selected station near Gherset dam, Mereb-Gash: *a* — mean monthly rainfall; *b* — mean annual relative humidity; *c* — precipitation; *d* — maximum temperature

Table 2. MK p -values and SS for various climatic variables

Station code	Elevation, m	P		T		PET	PET/P	
		MK	SS	MK	SS	mm y^{-1}	MK	SS
142381	1596	0.13	−13.02	0.26	0.02	2159.8	0.19	0.02
142384	1816	0.18	−6.60	0.16	0.02	2105.7	0.15	0.03
142388	1762	0.35	−3.00	0.10	0.03	1970.1	0.32	0.09
142391	2021	0.00	−13.00	0.01	0.03	1895.9	0.00	0.08
142394	2797	0.07	−11.73	0.00	0.04	1483.1	0.02	0.01
145378	1057	0.00	−27.30	0.08	0.03	2178.0	0.00	0.04
145381	1238	0.13	−6.00	0.06	0.03	2446.3	0.14	0.20
145384	1708	0.05	−8.10	0.02	0.03	2087.1	0.05	0.05
145384	1163	0.00	−20.83	0.00	0.05	1994.2	0.00	0.23
145388	1413	0.00	−6.60	0.00	0.03	2108.5	0.00	0.18
145391	1670	0.00	−16.03	0.00	0.05	1906.4	0.00	0.08
145394	2331	0.06	−11.40	0.00	0.04	1593.7	0.03	0.02
148369**	835	0.00	−24.10	0.03	0.03	2330.8	0.00	0.10
148372	1155	0.00	−34.10	0.05	0.03	2266.8	0.00	0.08
148375	843	0.00	−33.80	0.01	0.03	2257.1	0.00	0.09
148378	1163	0.01	−17.34	0.05	0.03	2221.7	0.01	0.04
148381	1270	0.01	−13.90	0.10	0.03	2129.2	0.03	0.04
148384	1634	0.00	−11.60	0.05	0.03	1912.5	0.00	0.05
148388	1762	0.00	−15.40	0.01	0.03	1970.1	0.32	0.10
148391	1545	0.00	−14.90	0.00	0.05	1854.1	0.00	0.07
148394	2324	0.35	−5.10	0.01	0.03	1779.6	0.27	0.03
151366	581	0.00	−20.80	0.00	0.04	2405.7	0.00	0.24
151369†	635	0.00	−27.40	0.00	0.04	2322.4	0.00	0.15
151372	878	0.00	−25.80	0.00	0.03	2324.8	0.00	0.10
151375††	917	0.01	−11.34	0.03	0.03	2409.2	0.01	0.09
151378	972	0.13	−6.00	0.06	0.03	2394.6	0.13	0.19
151381	995	0.01	−8.34	0.06	0.03	2293.4	0.01	0.18
151388*	2430	0.35	−8.63	0.05	0.03	1758.5	0.38	0.01
151391	1644	0.48	−4.20	0.02	0.03	1824.2	0.57	0.02
155366	555	0.00	−18.00	0.00	0.03	2381.4	0.00	0.31
155369	833	0.00	−20.36	0.00	0.03	2435.2	0.00	0.20
155372	833	0.00	−20.36	0.00	0.03	2350.5	0.00	0.20

NB: Station codes with asterisk represent stations that are used hereafter for illustration purposes; *near Adi-Halo dam, **near Gherasetdam, †near Fanco dam, and ††near Haikota town.

level, indicating a significant decreasing trend. But, the statistical analyses of whole reference time series data of T and PET/P highlight that the trends look predominantly increasing at a 95 % confidence level.

Other credible studies in the area could not verify these results, but regional studies give more or less similar indications. For example, a regional study on precipitation and temperature variables in the Horn of

Africa [31] over the period 1930–2014 showed that statistically, the trend of precipitation decreased insignificantly; the trend of temperature was observed to drop very significantly between 1930 and 1969, but it was dramatically elevated from 1970 to 2014. These overall trends are in line with the global predictions that revealed increased land surface air temperature and evapotranspiration and decreased precipitation amount,

in interaction with climate variability and human activities, leading to desertification in Sub-Saharan Africa (where the study area is located), parts of East and Central Asia, and Australia⁵.

Using the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman-Monteith methods from the “SPEI” package in R programming language, monthly and annual PET were calculated for all the 32 stations. Fig. 4 shows the comparison of PET estimation methods at different times of the year at two stations in the upper-third near the Adi-Halo dam and lower-third near the Gherset dam. The stations near Adi-Halo and Gherset dams are located at different elevations; 2,430 and 835 m above mean sea level, respectively. The Thornthwaite method was found to be highly dependent on the elevation of the station; it produced much lower PET values in loca-

tions at higher altitudes as compared to the other two methods. Fig. 4, *a* shows PET of the three methods at a station near the Adi-Halo dam with the Thornthwaite and Penman-Monteith method providing the lowest and highest values, respectively, whereas Hargreaves-based PET for the most part standing between the two methods. For example, in January, it can be seen that the Thornthwaite method is giving PET of 49.6 and 61.8 % lower than Hargreaves, and Penman-Monteith, respectively and the same is more or less true for the remaining months. Hargreaves and Penman-Monteith methods do not show such noticeable dependence on the elevation of a station and produced consistent PET, as shown in Fig. 4, *a* and *b*. In almost all cases, Penman-Monteith happens to be with the highest PET values.

Regression analyses were carried out to establish a relationship between the two methods with respect to Penman-Monteith. The results show a polynomial line of 2nd degree, having a coefficient of determination R^2 equal to 0.877 and 0.781 for Hargreaves vs. Penman-Monteith and Thornthwaite vs. Penman-Monteith,

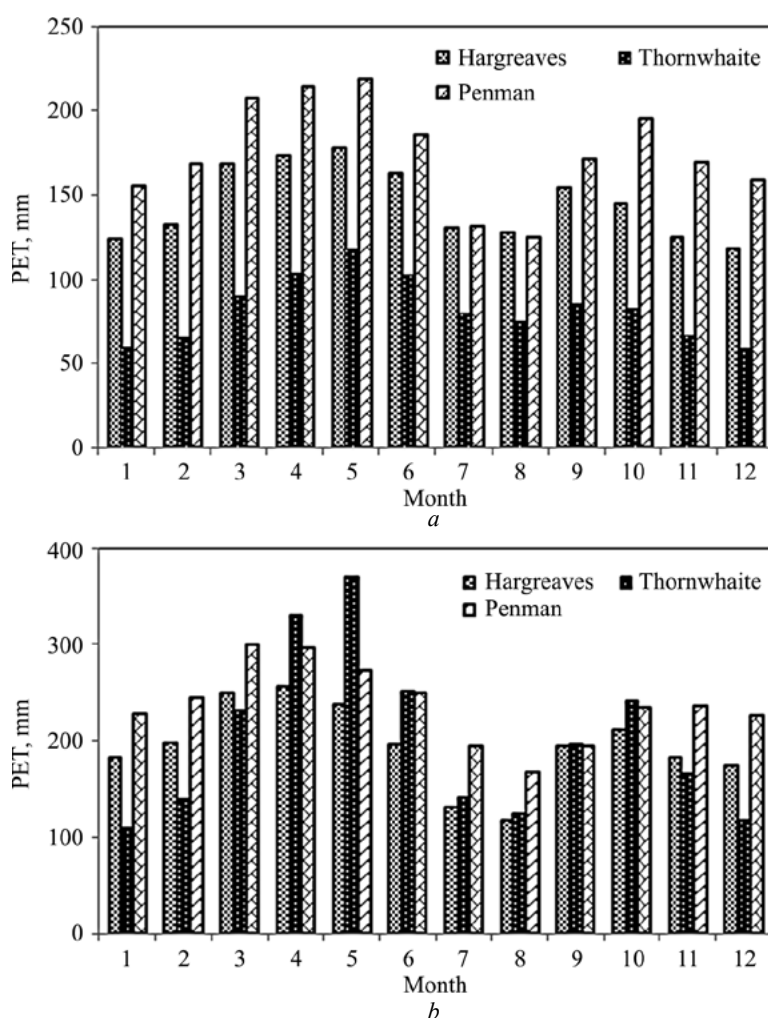


Fig. 4. Comparison of PET estimation methods in Mereb-Gash basin: *a* — at the upper third of the basin near Adi-Halo dam; *b* — at the lower third of the basin near the Gherset dam

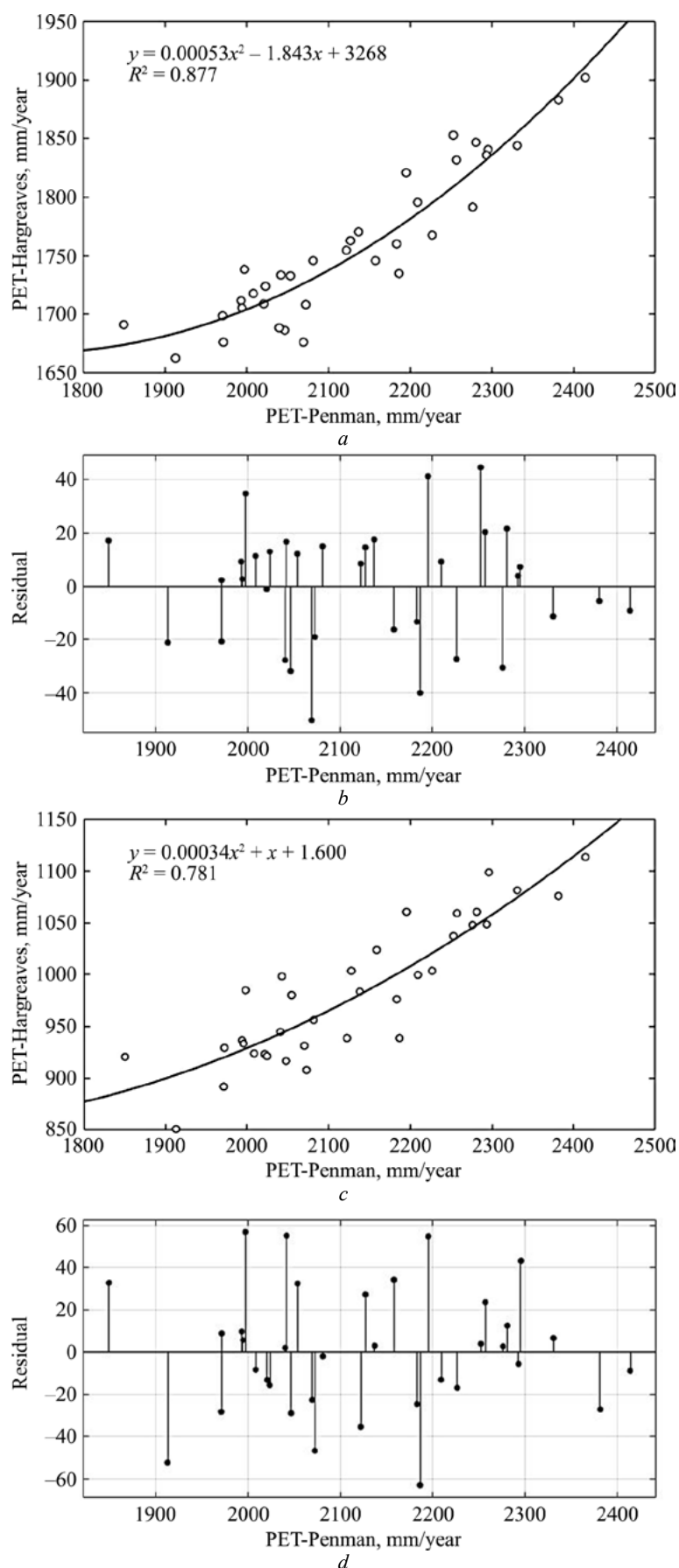


Fig. 5. Example on the relationship between PET estimation methods at a station near Adi-Halo dam: a — Hargreaves vs. Penman-Monteith; b — residual plot of Hargreaves vs. Penman-Monteith; c — Thornthwaite vs. Penman-Monteith; d — residual plot of Thornthwaite vs. Penman-Monteith

respectively (Fig. 5, *a* and *c*). Similarly, the residual plots shown in Fig. 5, *b* and *d* demonstrate randomly dispersed points around the horizontal axis, indicating a linear regression model could be appropriate for the data. It is obvious that such relationships could not be established for areas with different climatic and topographic conditions. For example [32], obtained various relations for different climatic conditions. Fig. 6 shows

the spatial variability of long-term annual PET of the Mereb-Gash basin for the values presented in Table 2. The upper-third of the area has the lowest PET, which is logical and continues to increase as we move towards the middle-third and lower-third portions of the basin.

Fig. 7 provides information about drought conditions at shorter and longer time scales (1, 3, 6, and 12 months) SPEI at a station near the Fanco dam in

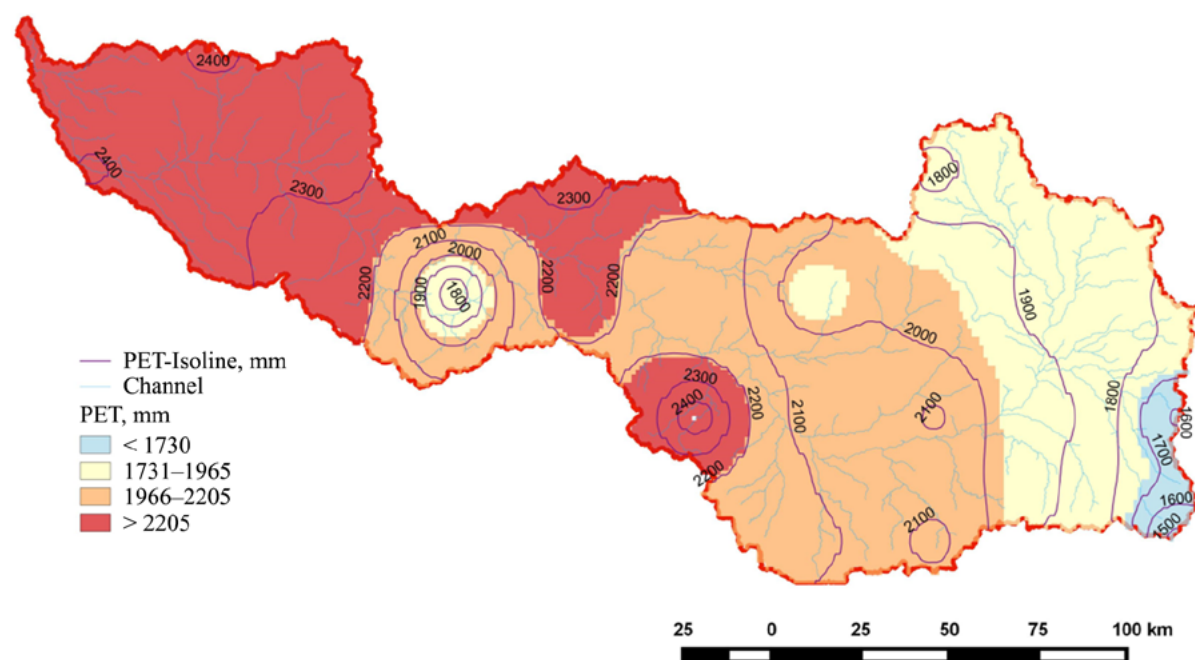


Fig. 6. Spatial variability of PET in Mereb-Gash basin

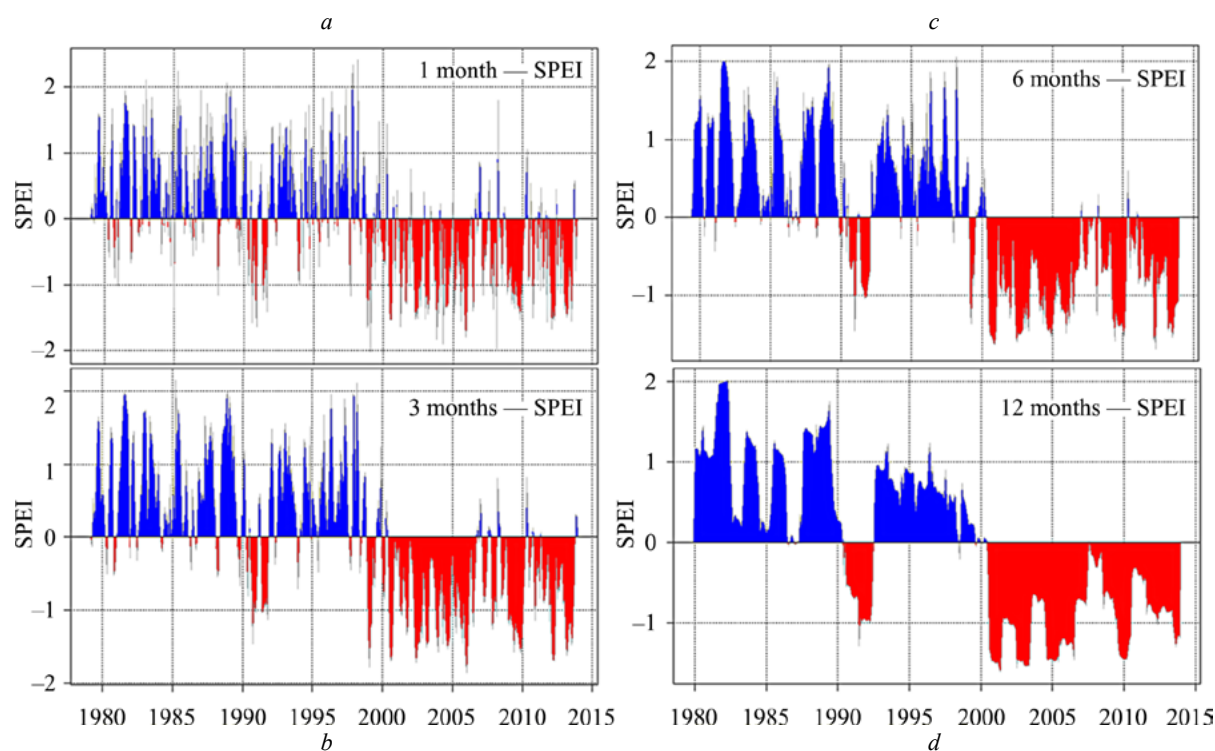


Fig. 7. The SPEI at lower-third of the Mereb-Gash basin near the Fanco dam at different time scales: *a* — 1 month; *b* — 3 months; *c* — 6 months; *d* — 12 months

Mereb-Gash. The period until the late 1990's show quasi-continuous humid conditions, with some minor drought periods. The persistent drought conditions during 2000–2013 are also clearly identified by the SPEI, independent of the time scale. Remarkably enough, the SPEI values of all the stations show similar trends. The spatial variability of the annual SPEI for the driest year (2003) for the whole basin is presented in Fig. 8. Unfortunately, the whole area had been exposed to severe and extreme drought conditions the fact that SPEI values are < -1.0 .

The same procedure was employed to the wettest year (1998), providing positive SPEI values (Fig. 9). As per the SPEI classification (Table 1), the basin was predominantly under normal and moderate wet conditions.

These findings are in congruence with global, regional, and local studies. For example, intergovernmental panel on climate change, IPCC⁵ showed that over the period 1961–2013, the annual area of drylands has increased with sizeable inter-annual variability. Also, the frequency and intensity of droughts have increased in

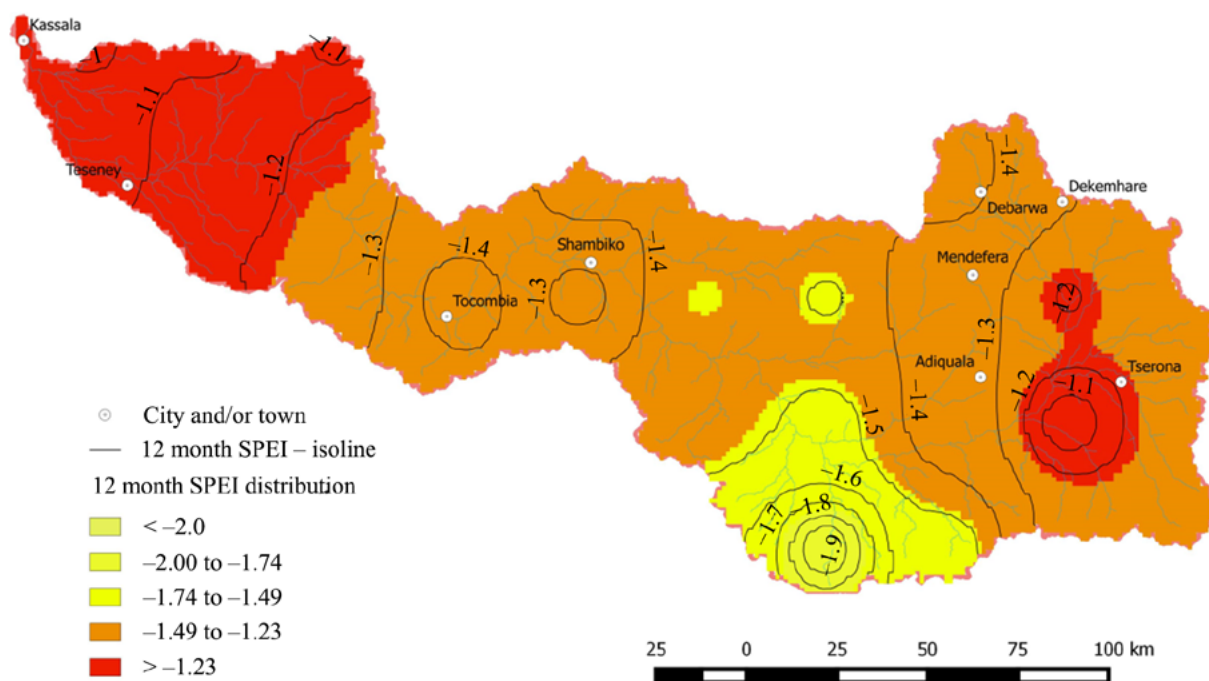


Fig. 8. Spatial variability of the SPEI for the driest year (2003)

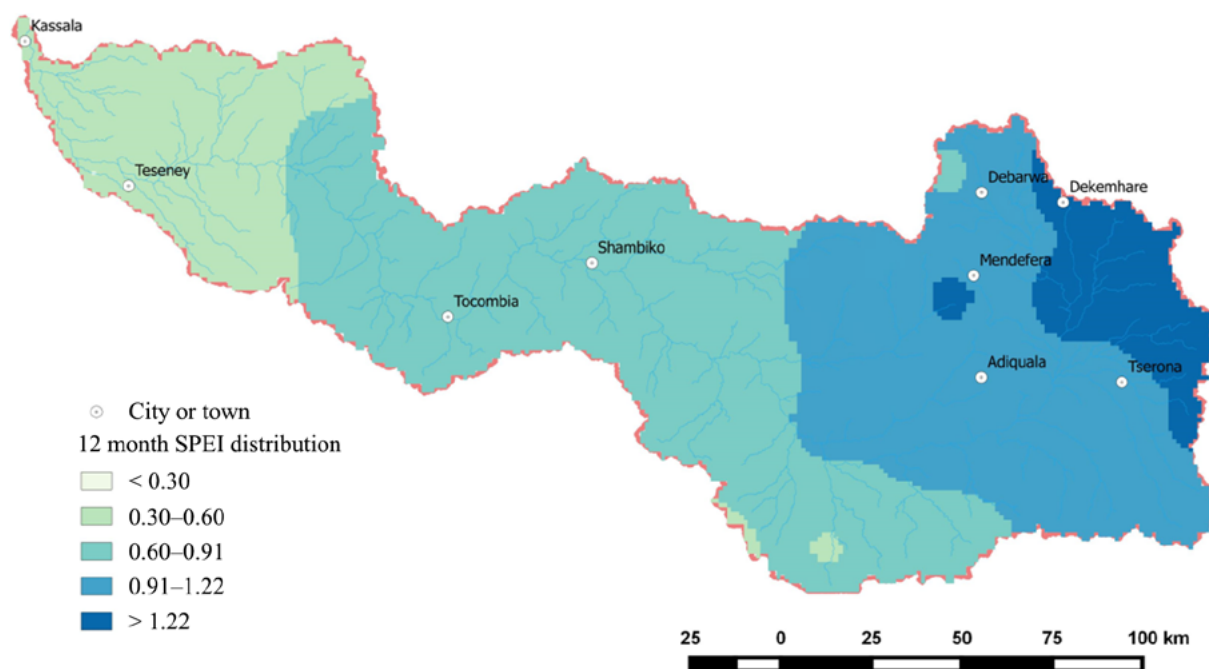


Fig. 9. Spatial variability of the SPEI for the wettest year (1998)

some regions, including the Mediterranean, West Asia, many parts of South America, much of Africa, and north-eastern Asia. A regional study on drought in the Horn of Africa [31] over the period 1930–2014 using the SPEI showed that the region experienced from mild to moderate drought throughout the study period with severe to extreme drought in some regions, particularly in 1943, 1984, 1991, and 2009. Thus, it would be necessary to consider the IPCC⁵ recommendation on actions that should be taken in the near-term, based on existing knowledge, to address desertification, land degradation, and food security while supporting longer-term responses that enable adaptation and mitigation to climate change. These include actions to build individual and institutional capacity, accelerate knowledge transfer, enhance technology transfer, and deployment, enable financial mechanisms, implement early warning systems and undertake risk management.

CONCLUSIONS

Conclusions inferred from this study could be summarized in the following statements:

The statistical analyses of the satellite-based global CFSR climatic data show that there is predominantly a significant monotonic trend. MK's p -values of precipitation, temperature, and potential evapotranspiration are less than the significance level ($\alpha = 0.05$) at a 95 % confidence interval for the majority of the stations. Hence, the null hypothesis of no significant monotonic trend is

rejected. Moreover, SS analyzes son precipitation from all the stations are less than 0 at a 95 % confidence level, indicating a decreasing trend. But, temperature and potential evapotranspiration trends were found to be predominantly increasing at a 95 % confidence level.

Among the potential evapotranspiration estimation methods, the Thornthwaite method was highly dependent on the elevation of the station. It produced much lower potential evapotranspiration values in locations at higher altitudes than at lower altitudes as compared to Hargreaves and Penman-Monteith. On the other hand, latter methods did not show such noticeable dependence on the elevation of a station and produced consistent estimation. In most parts of the cases, it was found that Penman-Monteith was providing the highest potential evapotranspiration estimations among the three methods.

The SPEI drought index of all stations shows sustained dry conditions during 2000–2013 and predominantly wet conditions during 1979–2000.

Finally, the reasons for the presence of significant trend in most of the climatic variables and persistent drought conditions in recent years in the study area in particular and in the region, in general, are highly likely to be linked to human activities and climate variability. That resulted from the land-use change, the land-use intensification and climate change contributing to desertification, and land degradation. Hence, concerted efforts are badly needed to reverse these human and climate-driven environmental repercussions.

REFERENCES

1. McGlynn B.L., Blöschl G., Borga M., Bormann H., Hurkmans R., Komma J. et al. *A data acquisition framework for runoff prediction in ungauged basins*. Runoff Prediction in Ungauged Basins, 2013; 29-52. DOI: 10.1017/CBO9781139235761.006
2. Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) — a review. *Hydrological Sciences Journal*. 2013; 58(6):1198-1255. DOI: 10.1080/02626667.2013.803183
3. Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambiri H., Lakshmi V. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*. 2003; 48(6):857-880. DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421
4. Beven K.J. *Rainfall-Runoff modelling: The primer*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2012. DOI: 10.1002/9781119951001
5. Ghebrehiwot A., Kozlov D. GIUH-Nash based runoff prediction for Debarwa catchment in Eritrea. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:05001. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705001
6. Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A. Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 87(3):103-122. DOI: 10.18720/MCE.87.9
7. Alemngus A., Mathur B.S. Geomorphologic instantaneous unit hydrographs for rivers in Eritrea (East Africa). *Journal of Indian Water Resources Society*. 2014; 34(1):1-14.
8. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(8):1023-1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036
9. Bashar K.E. *Gash river flash floods challenges to Kassala town: Mitigation and risk management*. 2011.
10. Elhassan E.S.E., Ibrahim A.M., Abdalla A. Flood modeling water appraisal and land reclamation: a case study of gash river. *SUST Journal of Engineering and Computer Science (JECS)*. 2015; 16(3):37-45.

11. Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes*. 2016; 30(19):3466-3477. DOI: 10.1002/hyp.10860
12. Dile Y.T., Srinivasan R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the Blue Nile river basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014; 50(5):1226-1241. DOI: 10.1111/jawr.12182
13. Fuka D.R., Walter M.T., MacAlister C., De-gaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton Z.M. Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*. 2014; 28(22):5613-5623. DOI: 10.1002/hyp.10073
14. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 out-perform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019; 124(16):9423-9441. DOI: 10.1029/2019jd031155
15. Zhu Q., Xuan W., Liu L., Xu Y.-P. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China. *Hydrological Processes*. 2016; 30(17):3061-3083. DOI: 10.1002/hyp.10846
16. Dile Y.T., Srinivasan R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014; 50(5):1226-1241. DOI: 10.1111/jawr.12182
17. Mann H.B. *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica*. 1945; 13(3):245. DOI: 10.2307/1907187
18. Kendall M.G. *Rank correlation methods*. 4th ed. London, Charles Griffin, 1975.
19. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968; 63:1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
20. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of Climate. *Geographical Review*. 1948; 38(1):55. DOI: 10.2307/210739
21. Hargreaves G.H., Samani Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1985; 1(2):96-99. DOI: 10.13031/2013.26773
22. Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Perrier A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 1994; 43(2):35-92.
23. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010; 23(7):1696-1718. DOI: 10.1175/2009jcli2909.1
24. Beguería S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*. 2014; 34(10):3001-3023. DOI: 10.1002/joc.3887
25. Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. 1993; 179-184.
26. Ahmad M.I., Sinclair C.D., Werritty A. Log-logistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 1988; 98(3-4):205-224. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90015-7
27. Singh V.P., Guo H., Yu F.X. Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*. 1993; 7(3):163-177. DOI: 10.1007/bf01585596
28. Hosking J.R.M. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1990; 52(1):105-124. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x
29. Van Rooy M.P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*. 1965; 14:43-48.
30. Alemngus A., Amlesom S., Bovas J.J.L. An overview of Eritrea's water resources. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2017; 13(3):74-84.
31. Ghebregabher M.G., Yang T., Yang X. Long-term trend of climate change and drought assessment in the Horn of Africa. *Advances in Meteorology*. 2016; 2016:1-12. DOI: 10.1155/2016/8057641
32. Gotardo J.T., Rodrigues L.N., Gomes B.M. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration: An approach to the management of water resources within an experimental basin in the Brazilian cerrado. *Engenharia Agrícola*. 2016; 36(6):1016-1026. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1016-1026/2016

Received September 22, 2019.

Adopted in a revised form on November 23, 2019.

Approved for publication December 29, 2019.

B I O N O T E S: **Anghesom A. Ghebrehiwot** — Lecturer, Department of Agricultural Engineering; **Hamelmallo Agricultural College, National Higher Education and Research Institute**; Keren-397, Keren, Eritrea; bahghi2012@gmail.com;

Dmitriy V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5878-6674; Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

Поступила в редакцию 22 сентября 2019 г.

Принята в доработанном виде 23 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2019 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Ангхесом Алемнгус Гебрехивот** — преподаватель кафедры агроинженерии; **Аграрный колледж Хамелмало, Национальный институт высшего образования и исследований**; Кэрэн-397, Кэрэн, Государство Эритрея; bahghi2012@gmail.com;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 004.9:[61:658.2]

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111

Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций

И.В. Каракозова¹, Г.Г. Малыха², А.С. Павлов³, А.С. Панин⁴, Н.Д. Теслер⁴

¹ Научно-исследовательский аналитический центр (НИАЦ); г. Москва, Россия;

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

³ Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций
(ВНИИАЭС); г. Москва, Россия;

⁴ Гипрокон; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Все более широкое распространение при проектировании зданий и сооружений получает информационное моделирование зданий BIM (Building Information Modeling). Большое значение для внедрения информационной технологии имеет принятие национальных и международных стандартов и классификаций. Перспективным представляется применение BIM-технологий для строительства общественных зданий, в первую очередь медицинских. Рассмотрены проблемы разработки собственных параметрических блоков (семейств) и организационной подготовки в условиях применения BIM-технологий.

Материалы и методы. Одна из задач информационных технологий — разработка спецификаций оборудования и передача их по технологической цепочке жизненного цикла строительного объекта. Для подготовки к использованию BIM-технологий требуется создание и применение классификаторов.

Результаты. Проанализирован проект медицинского научного центра с разнообразным составом оборудования. В проекте современного медицинского здания содержится описание нескольких сотен типов специфического медицинского оборудования. В спецификациях должны содержаться наименование и количество элементов оборудования, данные о габаритах, массе элементов, о способе подключения к электропитанию, водопроводу и канализации и др. При создании параметрических блоков часто используются зарубежные классификаторы Uniclass-2015 и OmniClass, хотя они не охватывают необходимой номенклатуры оборудования и противоречат практике закупок оборудования и работ для государственных нужд.

Выводы. Затраты на подготовку процесса проектирования в виде создания параметрических блоков могут составлять десятки и сотни человеко-дней, это следует учитывать при планировании проектных работ. В условиях закупок для государственных и муниципальных нужд необходимо составлять проектные спецификации в соответствии с имеющейся номенклатурой медицинского оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная технология, информационное моделирование зданий, BIM, автоматизированное проектирование, медицинские здания, параметрические блоки, семейства объектов, классификация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Павлов А.С., Панин А.С., Теслер Н.Д. Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 100–111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111

Study of preparatory activities on using BIM-technologies in the medical enterprise design

Irina V. Karakozova¹, Galina G. Malykha², Alexander S. Pavlov³, Andrey S. Panin⁴,
Nadezhda D. Tesler⁴

¹ Research analytical center (NIAZ); Moscow, Russian Federation;

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

³ All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (VNIIAES); Moscow, Russian Federation;

⁴ Gipronk; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When designing buildings and installations, Building Information Modeling (BIM) is spread more and more widely. The adoption of national and international standards and classifications is of great importance for the implementation of information technology. Application of the BIM-technologies for constructing public buildings, in the first turn, medical ones, seems to be very promising. The paper discusses the problems of developing indigenous parametric blocks (families) and preparatory activities in using the BIM-technology.

Materials and methods. One of the information technology tasks is to develop equipment specifications and transfer them through the technological chain of the construction facility life cycle. The creation and application of classifiers are necessary to prepare for using the BIM-technologies.

Results. A project of an academic health science centre with an extensive equipment range is analysed. The project of a modern medical building contains a description of several hundreds of specific medical equipment types. The specifications should contain information, including denominations and quantities of the equipment units, data on overall dimensions and weights of the units, connection interfaces to the power supply, water supply, water drainage. When creating parametric blocks, the international classifiers Uniclass-2015 and OmniClass are often used. However, they do not cover the necessary equipment range and contradict the domestic practice of purchasing equipment and services for state demand.

Conclusions. The cost of preparing for the design process as creating parametric blocks can make a total of tens or hundreds of man-days that should be taken into account when planning design activities. In terms of procurement for state and municipal demand, it is necessary to make design specifications following the available range of medical equipment.

KEYWORDS: information technology, building information modeling, BIM, computer-aided design, medical buildings, parametric blocks, facility families, classification

FOR CITATION: Karakozova I.V., Malykha G.G., Pavlov A.S., Panin A.S., Tesler N.D. Study of preparatory activities on using BIM-technologies in the medical enterprise design. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):100-111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Все более широкое распространение при проектировании зданий и сооружений получает информационное моделирование зданий BIM (Building Information Modeling), которое может быть рассмотрено как цифровое моделирование основных характеристик объекта строительства с целью улучшения взаимодействия и обмена цифровой информацией между участниками строительства [1]. Применение информационного моделирования в Великобритании, одного из лидеров по внедрению BIM, возросло с 10 % в 2011 г. до 70 % в 2018 г.¹

Большое значение для внедрения информационной технологии имеет принятие национальных и международных стандартов. Так, в Великобрита-

нии в 2013–2018 гг. был принят целый ряд стандартов, получивших международное признание. Однако основные принципы изготовления строительных чертежей, в том числе компьютерными методами, были изложены еще в 1984 г. в британском стандарте BS 1192-1:1984 «Практика строительного черчения. Рекомендации общих принципов». Впрочем, эти рекомендации скорее можно отнести к САПР. Указанный стандарт был заменен в 1999 г. группой европейских стандартов по строительному черчению, а также стандартом BS 1192:2007+A2:2016 «Совместная обработка архитектурной, инженерной и конструкторской информации. Практическое руководство».

В 2013–2019 гг. действовали общедоступные требования (Publicly Available Specification — аналог отечественных технических условий) PAS 1192-2:2013 «Спецификация для управления ин-

¹ National BIM report 2018. URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/the-national-bim-report-2018>

формацией на этапе капитальных и сдаточных работ строительных проектов с использованием информационного моделирования зданий». Они были заменены аналогичными по содержанию европейскими стандартами BS EN ISO 19650-1:2018 «Организация и цифровизация информации о зданиях и строительных работах, включая информационное моделирование зданий (BIM) — управление информацией с использованием информационного моделирования зданий. — Часть 1: Концепции и принципы» и BS EN ISO 19650-2:2018 «Часть 2. Этап сдачи объектов». Эти документы применимы ко всем этапам жизненного цикла здания, включая планирование, проектирование, инжиниринг, строительство, эксплуатацию, реконструкцию, ремонты и вывод из эксплуатации.

Кроме того, были выпущены требования PAS 1192-3:2014 «Спецификация по управлению информацией на этапе эксплуатации объекта с использованием информационного моделирования зданий»², стандарт BS 1192-4:2014 «Совместная обработка информации. Выполнение требований по обмену информацией с использованием COBie. Практическое руководство»³, требования PAS 1192-5:2015 «Спецификация для защищенного информационного моделирования зданий, цифровых встроенных сред и интеллектуального управления объектами»⁴ и PAS 1192-6:2018 «Спецификация для совместного использования структурированной информации об охране здоровья с применением BIM»⁵. Планируются к выпуску соответствующие части европейских стандартов серии BS EN ISO 19650, в которых фактически основой являются британские стандарты.

В руководстве BS 1192-4:2014 использован формат передачи данных Construction Operations Building Information Exchange (COBie), разработанный для BIM в 2007 г. [2] и основанный на электронных таблицах Excel и текстовом представлении данных [3, 4]. Этот формат, хотя и довольно громоздкий (заполняется свыше 300 граф электронных таблиц), может служить переходным звеном к организационно-экономическим моделям, обеспечивающим обработку информации в первую очередь для управления эксплуатацией здания [5, 6]. Однако для

разработки сметной и плановой документации, для организации строительства он мало приспособлен, так как содержит в основном данные об установленном оборудовании и помещениях.

Большие перспективы открывает применение BIM-технологий для строительства общественных зданий, в первую очередь медицинских. Руководство BSI-2018 посвящено вопросам информационной безопасности и безопасности труда на строительстве, призвано обеспечить снижение соответствующих рисков [7]. Аппаратура для виртуальной реальности уже применяется в медицине в виде томографов, тренажеров, индивидуального протезирования и др. [8]. В то же время специального документа по вопросам применения BIM для медицинских зданий и сооружений не выпущено. Между тем объекты медицинских организаций отличаются существенные особенности⁶ [9]. Создание здоровой, благоприятной окружающей среды важно для лечения пациентов и психологического состояния персонала [10, 11]. Большое значение имеют также пути эвакуации при аварийных ситуациях [12] и вообще объемно-планировочные решения зданий [13]. Особенно сложные вопросы решаются при проектировании зданий ядерной медицины [14–16].

Хотя считается, что крупные проекты медицинских зданий имеют более качественные проекты, они также не застрахованы от ошибок, которые подчас выявляются по мере эксплуатации медицинских центров [17]. Строительство зданий медицинского назначения обуславливает выполнение разнообразных монтажных и пусконаладочных работ, которые требуют интенсивной инженерной поддержки [18, 19].

Таким образом, при наличии большого количества стандартов и публикаций по теме информационного моделирования зданий, для конкретных приложений приходится разрабатывать собственные семейства заготовок и обеспечивать их применение. При этом не уделяется должного внимания организационной подготовке проектных организаций к широкому использованию BIM-технологий. Поэтому тема организации подготовительных работ остается актуальной для применения современных информационных технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Компьютерные фирмы, обеспечивающие использование BIM-технологий, обычно акцентируют внимание на преимуществах таких технологий. Неоспоримым плюсом их внедрения является снижение ошибок в проектной и рабочей документации,

⁶ Guidelines for design and construction of health care facilities // The American Institute of Architects Academy of Architecture for Health. Dallas, 2010. 176 p.

обнаружение коллизий, визуализация зданий, сооружений, строительных конструкций, инженерного и технологического оборудования, отображение процессов возведения сооружений [20, 21]. И внешне, особенно у специалистов по информационным технологиям, все выглядит довольно просто: архитектор набирает конструкции зданий из готовых «кубиков», и далее этот материал подхватывается и обрабатывается специалистами разного профиля, в том числе проектировщиками, строителями и монтажниками, а также поставщиками и эксплуатирующей организацией. Иногда даже рекомендуют стоимость оборудования и монтажа вводить в библиотечные элементы заранее, невзирая на особенности сметного ценообразования, условий поставки и конкурсных процедур [22].

В то же время практически все авторы отмечают необходимость значительных затрат времени и средств проектных организаций при подготовке к использованию BIM-технологий в своих проектах. Это связано прежде всего с наработкой библиотек параметрических блоков (семейств) для применяемых конструкций и оборудования. В частности, в популярной системе проектирования Autodesk Revit необходимо воспользоваться редактором семейств и шаблоном семейства. Создание семейства подразделяется на следующие этапы: анализ, построение каркаса, построение объемной геометрии, настройка материалов, видимости и графики, информационное наполнение и техническое описание⁷.

Указанные этапы связаны со знанием геометрии и топологии пространственных тел, стандартов изготовления и изображения конструкций, деталей и узлов, а также с освоением процедур, характерных для каждого программного средства в отдельности. Необходимо учитывать уровень детализации элементов, состав материалов и текстуру поверхности. Кроме того, при создании таких блоков неизбежны ошибки и переделки, что затягивает процесс их создания. Как правило, действующий архитектор или конструктор не имеет реальной возможности самому создавать соответствующие параметрические блоки (семейства), а приобретение заготовок со стороны чревато несовпадением требований проектной организации и заказчика с возможностями разработки. Поэтому проектной организации необходимо создавать специальную организационную структуру, которая обеспечивала бы длительный период подготовки к созданию проектной документации. Нечего и говорить, что при бюджетном финансировании на подобные действия нет ни времени, ни средств. Между тем доля работ,

финансируемых в порядке, оговоренном Федеральными законами № 44-ФЗ и № 223-ФЗ, достигает по некоторым оценкам 70 %. К тому же упомянутый редактор семейств предусматривает указание в шаблоне наименования фирмы-изготовителя, что запрещено российским законодательством.

В настоящей статье авторы обосновывают схему предпроектного этапа и оценивают необходимый объем подготовительных операций на примере проектирования зданий медицинского назначения. При этом были проанализированы нормативные и технические документы, используемые в практике проектных организаций, классификаторы и правила проектирования, а также материалы проектов зданий медицинского профиля.

Одним из основных вопросов подготовки к использованию BIM-технологий является создание и применение классификаторов. Основные принципы классификации строительных объектов и конструкций изложены в международном стандарте ISO 12006-2:2005⁸, выпущенном в России как ГОСТ Р ИСО 12006-2-2017. В нем на основе системного подхода перечисляются рекомендованные таблицы, которые должны содержаться в отраслевых классификаторах, в частности, строительная продукция и характеристики, строительные процессы и ресурсы, строительные комплексы и объекты, пространства, элементы, результаты и исполнители. В отечественной практике таких всеобъемлющих классификаторов нет: есть отдельно классификаторы ресурсов, машин, продукции. Даже классификатор работ существует только в сметных расценках и нормах времени.

В частности, классы медицинского оборудования встречаются в Общероссийском классификаторе продукции по видам экономической деятельности⁹, однако, там менее 90 позиций, которые можно было бы отнести к медицинскому оборудованию или специальной мебели. Для создания заказных спецификаций, заполнения опросных листов и контроля поставок такого количества недостаточно. Например, выделены следующие позиции:

23.42.10.18.2.01	Ванны медицинские.
28.25.12.64.2.03	Кондиционеры медицинские.
26.60.11.111	Томографы компьютерные.
26.60.11.113	Аппараты рентгенографические.
26.60.12.111	Электрокардиографы.
26.60.12.131	Томографы магнитно-резонансные.

⁸ ISO 12006-2:2005. Building construction — Organization of information about construction works. Part 2: Framework for classification of information, IDT.

⁹ ОК 034-2014 (КПЕС 2008). Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности : утв. Приказом Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163703

⁷ Руководство по созданию семейств Autodesk Revit. М.: AUTODESK, 2017. 45 с.

26.60.13.150	Аппараты ультразвуковой терапии.
26.60.13.160	Аппараты магнитотерапии.
26.60.13.170	Аппараты лазерной терапии.
26.60.14.110	Кардиостимуляторы.
26.60.14.120	Аппараты слуховые.
27.11.42.62.5.02	Трансформатор медицинский однофазный.
27.40.25.20.3.03	Светильник медицинский.
32.50.12.000	Стерилизаторы хирургические.
32.50.13.130	Хирургические инструменты.

Приказом Минздрава РФ от 6 июня 2012 г. № 4н утверждена номенклатурная классификация медицинских изделий по видам и классам¹⁰. Она насчитывает 19 рубрик первого уровня, более 400 рубрик второго уровня, а также свыше 24 тыс. наименований медицинских изделий. Каждому наименованию соответствует уникальный шестизначный код, а также подробное описание. Код изделия не включает шифр рубрики. Номенклатура не является строго иерархической, поэтому один и тот же код может встретиться в разных рубриках. Рубрики первого уровня приведены ниже:

1. Анестезиологические и респираторные медицинские изделия.
2. Вспомогательные и общебольничные медицинские изделия.
3. Гастроэнтерологические медицинские изделия.
4. Медицинские изделия для акушерства и гинекологии.
5. Медицинские изделия для диагностики in vitro.
6. Медицинские изделия для манипуляций/восстановления тканей/органов человека.
7. Медицинские изделия для оториноларингологии.
8. Медицинские изделия для пластической хирургии и косметологии.
9. Неврологические медицинские изделия.
10. Ортопедические медицинские изделия.
11. Офтальмологические медицинские изделия.
12. Радиологические медицинские изделия.
13. Реабилитационные и адаптированные для инвалидов медицинские изделия.
14. Сердечно-сосудистые медицинские изделия.
15. Стоматологические медицинские изделия.
16. Урологические медицинские изделия.
17. Физиотерапевтические медицинские изделия.
18. Хирургические инструменты/системы и сопутствующие медицинские изделия.
19. Эндоскопические медицинские изделия.

¹⁰ Номенклатурная классификация медицинских изделий по видам : утв. Приказом Минздрава РФ от 06.06.2012 № 4н. 18 с.

Классификация Uniclass-2015, применяемая в Великобритании для строительной отрасли, сочетает классификацию строительных ресурсов (продукции) со структурной классификацией работ [23]. Среди инженерных систем указываются электро- и газоснабжение, водоснабжение, внутренний транспорт и т.д. Специализированному медицинскому и лабораторному оборудованию посвящен раздел Pr-40-70-51, в котором только 14 кодов: оборудование для операционных и для стерилизации, аптечки и автоклавы, дефибрилляторы и ферментаторы, а также оборудование, относимое скорее к лабораторному: калориметры, термостаты, микроскопы, датчики, осциллографы. Еще около 30 позиций посвящено медицинской мебели (сейфы, стенды, тележки, кушетки, кресла, столы), а также коммуникациям медицинского назначения (газоснабжению, воздухообеспечению, вакуумированию, газоудалению). Таким образом, в данном классификаторе установлены только базовые рубрики без указания параметров оборудования, что также не позволяет создавать полноценные спецификации.

Значительно более подробный классификатор OmniClass¹¹ разработан для строительной отрасли США. В нем медицинскому оборудованию, включая стоматологию и ветеринарию, отведено почти 1,3 тыс. позиций, что по глубине близко к номенклатуре Минздрава РФ. Классификация также производится по назначению элементов оборудования, в то время как в Общероссийском классификаторе позиции разнесены в основном по принципу действия. Сопоставление структуры номенклатуры Минздрава РФ и классификатора OmniClass приведено в табл. 1.

Классификация материально-технических ресурсов и оборудования имеет большое значение для систематизации, мониторинга, анализа и формирования групп заданных ресурсов как при ведении сметно-нормативной базы, разработке проектной документации, так и при проведении торгов и закупки оборудования. Действующий в настоящее время классификатор ОК 034-2014 (ОКПД-2) не содержит полную информацию о классификации медицинского оборудования и инструментов. Это не позволяет с высокой долей достоверности определить затраты на оборудование при подготовке проектной документации в случае, если при получении информации не используются прайс-листы [24]. С целью решения этой проблемы разработан классификатор с системой кодирования материально-технических ресурсов и оборудования на основе ОКПД-2 для применения в области ценообразова-

¹¹ The OmniClass construction classification system tables. URL: <http://omniclass.org/>

Табл. 1. Фрагменты классификаторов продукции

Table 1. Fragments of product classifiers

Номенклатура медицинских изделий (РФ) / Medical product classifier (Russian Federation)	Классификатор OmniClass (США) / OmniClass classifier (USA)
15. Стоматологические медицинские изделия / Dental products	23-25 17 00 Продукция для стоматологии / Dental Products
15.1. Аппликаторы стоматологические / Dental applicators	23-25 17 11 Мебель стоматологическая / Dental Furnishings
15.2. Бормашин и сопутствующие изделия / Burs and related products	23-25 17 13 Оборудование стоматологическое / Dental Equipment
15.3. Детекторы зубного кариеса и сопутствующие изделия / Dental caries detectors and related products	23-25 17 13 11 Печи стоматологические / Dental Furnaces
15.4. Зонды стоматологические / Dental probes	23-25 17 13 13 Вытяжки стоматологические / Dental Specialized Hoods
15.5. Изделия для моделирования поверхности пломбы / Filling surface modeling tools	23-25 17 13 15 Изделия для зубохирургических процедур / Dental Procedure Products
15.6. Изделия для удаления зубного камня / Dental calculus removal tools	23-25 17 13 15 01 Инструменты для размещения известки / Calcium Hydroxide Placement Tools
15.7. Изделия ортодонтические / Orthodontic products	23-25 17 13 15 03 Инструменты для размещения композитов / Composite Placement Tools
119400 Набор стоматологических адгезивных материалов / Dental adhesive set	23-25 17 13 15 05 Инструменты для снятия коронок / Crown Or Bridge Removers
119750 Набор для удаления слюны стоматологический / Dental saliva removal set	23-25 17 13 15 07 Резчик амальгамы / Dental Amalgam Carvers
119780 Ретрактор щеки стоматологический / Dental cheek retractor	23-25 17 13 15 09 Амальгаматор / Dental Amalgamator
121960 Набор стоматологический для создания мостовидного протеза / Dental bridge creation set	23-25 17 13 15 11 Набор для зубохирургической анестезии / Dental Anesthesia Sets
236000 Устройство для охлаждения проволочной дуги ортодонтического аппарата / Orthodontic apparatus wire arch cooler	23-25 17 13 15 13 Держатели боров / Dental Bur Holders
236040 Динамометр для ортодонтического аппарата / Orthodontic apparatus dynamometer	23-25 17 13 15 15 Полировщики зубов / Dental Burnishers
236350 Аппарат ортодонтический внеротовой / Extraoral orthodontic apparatus	23-25 17 13 15 17 Стоматологические боры / Dental Burs
236460 Инструмент измерительный для ортодонтических брекетов / Orthodontic bracket calipers	23-25 17 13 15 19 Зубные измерители / Dental Calipers
15.9. Инструменты для введения пломбировочного материала / Filling material injection tools	23-25 17 13 15 21 Криохирургические установки / Dental Cryosurgical Units

ния в строительном комплексе г. Москвы с учетом параметров, оказывающих влияние на формирование сметной цены на ресурс.

В табл. 2 приведен фрагмент классификации и формирования кода медицинского инструмента на основе ОКПД-2. При этом следует отметить, что для конкретизации выбора медицинского инструмента было разработано расширение кода, где код типа 1 зависит от области применения, а код типа 2 — от привода инструмента. Порядковый номер инструменту может присваиваться в зависимо-

сти от того параметра, который наилучшим образом подчеркивает его уникальность по отношению к аналогичным ресурсам. Например, для терапевтических ручных инструментов таким параметром будет выступать форма рабочей головки инструмента, диаметр рабочей части инструмента, используемый абразивный материал и др.

Следует отметить, что при разработке классификации и системы кодирования материально-технических ресурсов, оборудования, мебели, инвентаря и принадлежностей, используемых в строительной от-

Табл. 2. Фрагмент классификации и формирования кода медицинского инструмента на основе ОКПД-2

Table 2. A fragment of OKPD-2-based medical tool code classification and formation

Классификационно-идентификационный код / Classification and identification code	Уровень кода / Code level	Наименование оборудования, мебели, инвентаря и принадлежностей, его свойств и характеристик / Name of equipment, furniture, inventory, and accessories, its properties and features
32	Класс / Class	Изделия готовые прочие / Other prefabricated products
32.5	Подкласс / Subclass	Инструменты и оборудование медицинские / Medical tools and equipment
32.50	Группа / Group	Инструменты и оборудование медицинские / Medical tools and equipment
32.50.1	Подгруппа / Subgroup	Инструменты и приспособления хирургические и стоматологические / Surgical and dental tools and equipment
32.50.11	Вид / Type	Инструменты и приспособления стоматологические / Dental tools and equipment
32.50.11.000	Категория / Category	Инструменты и приспособления стоматологические / Dental tools and equipment
---	Подкатегория / Subcategory	Отсутствует / None
Код типа 1 в зависимости от области применения / Type code 1 depending on the application		
32.50.11.000.01		Общего назначения / General-purpose
32.50.11.000.02		Терапевтические / Therapeutic
32.50.11.000.03		Хирургические / Surgical
32.50.11.000.04		Ортопедические / Orthopedic
32.50.11.000.05		Зуботехнические / Dental
Код типа 2 в зависимости от привода / Type code 2 depending on the drive		
32.50.11.000.XX.01		Ручные / Manual
32.50.11.000.XX.02		Аккумуляторные / Accumulator
32.50.11.000.XX.03		Электрические / Electrical
32.50.11.000.XX.04		Комбинированные / Combined
32.50.11.000.XX.XX.XXX		Порядковый номер присваивается в зависимости от других дополнительных характеристик (XXX) / The ordinal number is assigned depending on additional features (XXX)

расли, принят фасетно-иерархический метод классификации, базирующийся на отдельных принципах ОК 034-2014. При расширении кода ресурса предложено использовать наиболее значимые параметры ресурса, подтверждаемые, в том числе действующими нормативно-техническими документами в области стандартизации. Например, оборудование, мебель, инвентарь и принадлежности группируются в зависимости от их функционального назначения. К техническим характеристикам в этом случае для идентификации ресурса относятся геометрические размеры, материал изготовления, комплектность, область применения, возраст пользователей, грузоподъемность, мощность и др. Тем не менее опыт внедрения BIM-проектирования для медицинской отрасли¹² показывает возможность такого подхода и целесообразность применения современных информационных технологий.

Для выявления количественных оценок применимости тех или иных классификаторов был проанализирован проект медицинского научного центра с разнообразным составом оборудования. В составе проекта выполнялись поэтажные спецификации оборудования и мебели, предназначенных для приемного и клинично-диагностического отделений, амбулатории и стационара, отделений лучевой и функциональной диагностики и др.

Для исследования процедур предпроектной подготовки в составе жизненного цикла медицинского объекта была использована работа И.А. Дорогана, направленная на совершенствование совместной работы заказчика и проектной организации [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Здания и сооружения медицинских организаций отличаются от других гражданских зданий и сооружений высокой насыщенностью оборудованием, инструментами и инвентарем, характерным скорее для промышленных объектов. Если для строительных конструкций можно использовать обычные параметрические блоки, моделирующие сборные или монолитные конструкции, то для медицинского оборудования, как правило, таких шаблонов нет. В связи с этим были рассмотрены спецификации, указанные в предыдущем разделе.

В рассмотренных спецификациях главного здания медицинского научного центра содержится свыше 2 тыс. позиций различного оборудования и мебели (не считая элементов инженерных сетей), из них более 600 неповторяющихся видов. Общее количество элементов превышает 6 тыс. При этом

около половины видов относится к мебели, бытовому оборудованию, устройствам связи, телевидения и энергообеспечения, остальное является медицинским оборудованием. Таким образом, в проекте современного медицинского здания содержится описание нескольких сотен типов специфического медицинского оборудования. Отметим, что в спецификации имеется не только наименование и количество элементов оборудования, но и данные о габаритах, массе элементов, о способе подключения к электропитанию, водопроводу и канализации. Для уникального оборудования и для оборудования, прошедшего конкурсные процедуры, указывается страна происхождения и фирма-производитель.

Опыт применения зарубежных программных средств демонстрирует, что при создании семейств (параметрических блоков) в основном используются классификаторы на базе Uniclass-2015 и OmniClass, хотя, как показано в предыдущем разделе, они не охватывают необходимой номенклатуры оборудования и противоречат практике закупок оборудования и работ для государственных нужд. В результате исследования можно сделать вывод о том, что наилучшим образом для целей проектирования и тендерных закупок подходит номенклатурная классификация. В ней содержится наибольшее количество специфических типов оборудования, подробное техническое описание, а в ряде случаев технические параметры оборудования. Такие сведения могут быть использованы не только для конкурсных процедур, но и для передачи данных BIM-технологий. Некоторым недостатком является то, что номенклатура не разделена на оборудование, входящее в основные средства, и расходные материалы, которые относятся к оборотным средствам (см. позицию 119400 в табл. 1).

Цифровые BIM-модели указанного оборудования должны быть подготовлены на начальном этапе проектирования, а лучше всего — на предпроектном этапе. При этом далеко не все модели будут повторяться в другом проекте: учитывая специализацию медицинских учреждений, многие виды оборудования являются специфическими для различных проектов. Приняв условно время разработки одного BIM-семейства в размере одного человеко-дня, затраты на подготовку процесса проектирования могут составлять десятки и сотни человеко-дней. Этот факт необходимо учитывать при планировании проектно-исследовательских работ.

Изучение процедур предпроектной подготовки приводит к целесообразности внедрения развернутых схем выполнения предпроектного этапа жизненного цикла строительного объекта медицинского назначения. Дело осложняется тем, что до проведения конкурса (а большинство зданий медицинских организаций строится по государственному заказу)

¹² BIM для медицинских объектов: стандартизация на базе единой информационной модели в Autodesk Revit. URL: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/werfau-web.pdf>

проектная организация не может приступить к проектно-изыскательским работам. Возможно, двух-этапный конкурс, законодательно разрешенный для таких работ, позволит устранить это ограничение.

Представленная таким образом последовательность бизнес-процессов предпроектного этапа выглядит для проектировщика зданий медицинского назначения следующим образом:

- заключение договора на работы предпроектного этапа;
- предварительное определение конфигурации медицинского оборудования и помещений;
- классификация и разработка перечня типов медицинского оборудования и конструкций;
- предварительный подбор поставщиков, заполнение опросных листов;
- создание параметризуемых семейств BIM-моделей (начальный уровень проработки, LOD 100–LOD 200);
- разработка эскизного проекта с помощью BIM-технологии;
- содействие заказчику в подготовке исходно-разрешительной документации и задания на проектирование;
- участие в конкурсе на проектно-изыскательские работы.

В последующем в зависимости от объема договорных обязательств проектировщик участвует в следующих бизнес-процессах:

- заключение договора на проектно-изыскательские работы;
- содействие заказчику в получении технических условий и специальных технических условий;
- содействие заказчику в проведении конкурсов на поставку медицинского оборудования;
- доработка параметризуемых семейств BIM-моделей (средний уровень проработки, LOD 300–LOD 350);
- разработка архитектурной части проектной документации на основе BIM-технологии;
- разработка инженерных частей проектной документации с использованием моделей;

• разработка технологической части проектной документации с использованием моделей;

• разработка сметной документации и проекта организации строительства с использованием моделей;

• содействие заказчику в получении положительного заключения государственной экспертизы;

• выполнение рабочей документации с использованием моделей (подробный уровень проработки, LOD 400);

• проверка выполнения технических требований и авторский надзор.

Выполнение дополнительных обязанностей проектировщика, связанных с внедрением информационных технологий, должно быть учтено в нормативных сроках и объемах оплаты проектных работ. Методика определения стоимости работ по подготовке проектной документации, содержащей материалы в форме информационной модели, находится в стадии разработки. В проекте указанной методики предусмотрено увеличение затрат на соответствующие разделы проектов лечебно-оздоровительных объектов на 17–20 %. При этом стоимость первой стадии документации (проектной документации) должна увеличиться с 40 до 60 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что в проекте современного медицинского здания содержится описание нескольких сотен типов специфического медицинского оборудования. Затраты на подготовку процесса проектирования могут составлять десятки и сотни человеко-дней. В условиях закупок для государственных и муниципальных нужд необходимо составлять проектные спецификации в соответствии с имеющейся номенклатурой медицинского оборудования, утвержденной Минздравом РФ. Составленный перечень бизнес-процессов на подготовительном и проектном этапах поможет планировать работу проектной организации и повысить качество выпускаемой документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers, Third Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568
2. Pärn E.A., Edwards D.J. Conceptualising the FinDD API plug-in: A Study of BIM-FM integration // Automation in Construction. 2017. Vol. 80. Pp. 11–21. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.03.015

3. East B. Construction-Operations Building Information Exchange (COBie). WBDG, 2016. URL: <https://wbdg.org/resources/construction-operations-building-information-exchange-cobie>

4. East B., Carrasquillo-Mangual M. The COBie Guide: a commentary to the NBIMS-US COBie standard. ERDC, Champaign, US. 125 p. URL: <https://portal.nibs.org/files/wl/?id=GvMvniYRQOUN77pPyhtx2QXVqOgNmpie>

5. *Benghi C.* Automated verification for collaborative workflows in a Digital Plan of Work // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102926. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102926
6. *Pishdad-Bozorgi P., Gao X., Eastman Ch., Self A.P.* Planning and developing Facility Management-enabled Building Information Model (FM-enabled BIM) // *Automation in Construction*. 2018. Vol. 87. Pp. 22–38. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.004
7. *Аленьков В.В., Куприяновский В.П., Ша-клеин А.Г., Овсянников М.Л., Чеботарев Е.М., Ярцев Д.И. и др.* Использование структурированной информации BIM для охраны здоровья и безопасности работающих в строительстве // *International Journal of Open Information Technologies*. 2018. Vol. 6. No. 5. Pp. 39–50.
8. *Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П.* Об использовании виртуальной и дополненной реальности // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7. No. 4. Pp. 75–84.
9. *Meuser P., Labryga F., Pawlik P., Schirmer C.* Krankenhausbauten/Gesundheitsbauten. Handbuch und Planungshilfe. Band 1: Allgemeinkrankenhäuser und Gesundheitszentren. Band 2: Spezialkliniken und Fachabteilungen. DOM publishers; Auflage: 2. Vollständig. überarb. 2011. 752 p.
10. *Levin D.* General hospitals planning and design. Design Media Publishing Ltd, 2014. 320 p.
11. *Guenther R., Vittori G.* Sustainable healthcare architecture: designing a healing environment. John Wiley & Sons, Inc, 2013. 449 p.
12. *De-Ching H., Shen-Wen C., Chien-Hung L., Po-Ta H., Yi-Ting S., Huei-Ru S.* A study for the evacuation of hospital on fire during construction // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. Pp. 139–146. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.639
13. *Malkin J.* Medical and dental space planning. NY : John Wiley & Sons, Inc, 2014. 688 p. DOI: 10.1002/9781119174813
14. *Malykha G.G., Dorogan I.A., Tesler N.D.* Improving processes of design and construction of nuclear medicine facilities // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. P. 08054. DOI: 10.1051/matec-conf/201710608054
15. *Tesler N.* Analysis of methods for reconstruction of multiuse medical facilities // *Digest of articles research and student conference «Architecture, Ecology and Geography»*, Geneva, 2015. Pp. 77–95.
16. *Lewellen T.K., DeWitt D., Miyaoka R.S., Hauck S.* A building block for nuclear medicine imaging systems data acquisition // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2014. Vol. 61. Issue 1. Pp. 79–87. DOI: 10.1109/tns.2013.2295037
17. *Carretero-Ayuso M., García-Sanz-Calcedo J.* Analytical study on design deficiencies in the envelope projects of healthcare buildings in Spain // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 42. Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.scs.2018.07.004
18. *Ryan S.* Designing for human ability // *S. Ryan. Medical Construction & Design*. Sept-Oct. 2017. Pp. 42–48.
19. *Şener M.* A multidisciplinary analysis of standardization in public health facility architecture in Turkey // *12th International Conference Standardization, Property and Quality*. 2015. Vol. 1. Issue 12. Pp. 193–203.
20. *Hartmann T., van Meerveld H., Vosseveld N., Adriaanse A.* Aligning building information model tools and construction management methods // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 22. Pp. 605–613. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.12.011
21. *Grilo A., Jardim-Goncalves R.* Value proposition on interoperability of bim and collaborative working environments // *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Issue 5. Pp. 522–530. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.11.003
22. *Талалов В.В.* Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий. Саратов : Профобразование, 2017. 392 с.
23. *Dawood N., Sriprasert E., Mallasi Z., Hobbs B.* Development of an integrated information resource base for 4D/VR construction processes simulation // *Automation in Construction*. 2003. Vol. 12. Issue 2. Pp. 123–131. DOI: 10.1016/S0926-5805(02)00045-6
24. *Wu J., Zhang J.* New automated BIM object classification method to support BIM interoperability // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019. Vol. 33. Issue 5. P. 04019033. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858
25. *Дорогань И.А.* Управление требованиями при строительстве зданий медицинских организаций // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 8. С. 1046–1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056

Поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 30 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 декабря 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Ирина Викторовна Каракозова** — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела методологии разработки и актуализации нормативно-методических документов в строительстве; **Научно-исследовательский аналитический центр (НИАЦ)**; 125047, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 8; РИНЦ ID: 655795, Scopus: 57190864252; karakozovaiv@str.mos.ru;

Галина Геннадьевна Малыха — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 375946, Scopus: 57191528775; sotae@mgsu.ru;

Александр Сергеевич Павлов — доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя департамента экспертизы и оптимизации проектных решений; **Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС)**; 109507, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25; РИНЦ ID: 79850; a.s.pavlov@inbox.ru;

Андрей Семенович Панин — главный архитектор проектов; **Гипрокон**; 129090, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 7; info@giprocon.com;

Надежда Дмитриевна Теслер — главный архитектор проектов; **Гипрокон**; 129090, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 7; РИНЦ ID: 810691; info@giprocon.com.

REFERENCES

1. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. *BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers, Third Edition*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568
2. Pärn E.A., Edwards D.J. Conceptualizing the FinDD API plug-in: A Study of BIM-FM integration. *Automation in Construction*. 2017; 80:11-21. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.03.015
3. East B. *Construction-Operations Building Information Exchange (COBie)*. WBDG, 2016. URL: <https://wbdg.org/resources/construction-operations-building-information-exchange-cobie>
4. East B., Carrasquillo-Mangual M. *The COBie Guide: a commentary to the NBIMS-US COBie standard*. ERDC, Champaign, US. 125. URL: <https://portal.nibs.org/files/wl/?id=GvMvniYRQOUN77pPyhtx2QXVqOgNmpie>
5. Benghi C. Automated verification for collaborative workflows in a Digital Plan of Work. *Automation in Construction*. 2019; 107:102926. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102926
6. Pishdad-Bozorgi P., Gao X., Eastman Ch., Self A.P. Planning and developing Facility Management-enabled Building Information Model (FM-enabled BIM). *Automation in Construction*. 2018; 87:22-38. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.004
7. Alenkov V., Kupriyanovsky V., Shaklein A., Ovsianikov M., Chebotarev E., Yartsev D. et al. On using structured BIM information to protect the health and safety of workers in construction. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018; 6(5):39-50. (rus.).
8. Kuznetsov V.A., Russu U.G., Kupriyanovsky V.P. On the use of virtual and augmented reality. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(4):75-84. (rus.).
9. Meuser P., Labryga F., Pawlik P., Schirmer C. *Krankenhausbauten/Gesundheitsbauten. Handbuch und Planungshilfe. Band 1: Allgemeinkrankenhäuser und Gesundheitszentren. Band 2: Spezialkliniken und Fachabteilungen*. DOM publishers; Auflage: 2. Vollständ. überarb. 2011; 752.
10. Levin D. *General hospitals planning and design*. Design Media Publishing Ltd, 2014; 320.
11. Guenther R., Vittori G. *Sustainable healthcare architecture: designing a healing environment*. John Wiley & Sons, Inc, 2013; 449.
12. De-Ching H., Shen-Wen C., Chien-Hung L., Po-Ta H., Yi-Ting S., Huei-Ru S. A study for the evacuation of hospital on fire during construction. *Procedia Engineering*. 2011; 11:139-146. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.639
13. Malkin J. *Medical and dental space planning*. NY, John Wiley & Sons, Inc, 2014; 688. DOI: 10.1002/9781119174813
14. Malykha G.G., Dorogan I.A., Tesler N.D. Improving processes of design and construction of nuclear medicine facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:08054. DOI: 10.1051/mateconf/201710608054
15. Tesler N. Analysis of methods for reconstruction of multiuse medical facilities. *Digest of articles research and student conference "Architecture, Ecology and Geography"*. Geneva, 2015; 77-95.
16. Lewellen T.K., DeWitt D., Miyaoka R.S., Hauck S. A building block for nuclear medicine imaging systems data acquisition. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2014; 61(1):79-87. DOI: 10.1109/tns.2013.2295037
17. Carretero-Ayuso M., García-Sanz-Calcedo J. Analytical study on design deficiencies in the envelope projects of healthcare buildings in Spain. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 42:139-147. DOI: 10.1016/j.scs.2018.07.004
18. Ryan S. Designing for human ability. *S. Ryan. Medical Construction & Design*. Sept-Oct. 2017; 42-48.
19. Şener M. A multidisciplinary analysis of standardization in public health facility architecture in Turkey. *12th International Conference Standardization, Property and Quality*. 2015; 1(12):193-203.

20. Hartmann T., van Meerveld H., Vosseveld N., Adriaanse A. Aligning building information model tools and construction management methods. *Automation in Construction*. 2012; 22:605-613. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.12.011
21. Grilo A., Jardim-Goncalves R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*. 2010; 19(5):522-530. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.11.003
22. Talalov V.V. *Fundamentals of BIM. Introduction to Building Information Modeling*. Saratov, Proftekhobrasovaniye Publ., 2017; 392. (rus.).
23. Dawood N., Sriprasert E., Mallasi Z., Hobbs B. Development of an integrated information resource base for 4D/VR construction process simulation. *Automation in Construction*. 2003; 12(2):123-131. DOI: 10.1016/S0926-5805(02)00045-6
24. Wu J., Zhang J. New automated BIM object classification method to support BIM interoperability. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019; 33(5):04019033. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858
25. Dorogan I.A. Requirements management in the medical building construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):1046-1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056 (rus.).

Received November 8, 2019.

Adopted in a revised form on November 30, 2019

Approved for publication December 27, 2019.

BIONOTES: **Irina V. Karakozova** — PhD, Associate Professor, Head of the Department for the Methodology of Rules Development in Construction; **Research Analytical Center (NIAZ)**; 8 2nd Brestskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; RISC ID: 655795, Scopus: 57190864252; karakozovaiv@str.mos.ru;

Galina G. Malykha — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations; **Moscow State National Research University of Civil Engineering (National Research) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; RISC ID: 375946, Scopus: 57191528775; sotae@mgsu.ru;

Alexander S. Pavlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of Department of expertise and optimization of design solutions; **All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (VNIIAES)**; 25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russian Federation; RISC ID: 79850; a.s.pavlov@inbox.ru;

Andrey S. Panin — chief project architect; **Giprocon**; 7 Gilyarovskiy st., Moscow, 129090, Russian Federation; info@giprocon.com;

Nadezhda D. Tesler — chief project architect; **Giprocon**; 7 Gilyarovskiy st., Moscow, 129090, Russian Federation; RISC ID: 810691; info@giprocon.com.

Ресурсосбережение: основные этапы становления, теории и методы, тенденции и перспективы развития в промышленности и строительной индустрии России

Э.С. Цховребов

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (НИИ «ЦЭПП»);
г. Мытищи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена одна из актуальных современных экологических, технологических и экономических проблем — экономия, рациональное использование, сбережение природных, материальных и энергетических ресурсов. На основе глубокого обзора научных исследований и нормативных документов предложены пути решения проблемы ресурсосбережения в контексте устойчивого развития промышленности и строительной индустрии, формирования «зеленой» экономики, обеспечения экологической безопасности, научно-технологического развития России.

Материалы и методы. Проанализированы зарубежные и отечественные опубликованные материалы, нормативные правовые акты, документы по стандартизации в области формирования понятийного аппарата, правовых норм, основных теорий, концепций и методов, перспективных направлений развития ресурсосбережения, рационального использования природных ресурсов, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот. В качестве метода исследования предложен системный анализ способов, алгоритмов решения поставленной в исследовании научной проблемы.

Результаты. Впервые в современной научной литературе дан обширный всесторонний тематический обзор нормативно-методической литературы, научных, исследовательских работ в сфере различных аспектов ресурсосбережения: правовых, организационно-технических, экологических, технологических, социально-экономических. Выявлены и сформулированы приоритетные направления, подлежащие в дальнейшем углубленному теоретическому и прикладному исследованию. Предложены конкретные меры нормативно-правового регулирования, организации, экономического стимулирования деятельности в области ресурсосбережения и использования вторичных ресурсов.

Выводы. Научная новизна заключается в предложенном системном подходе к формированию комплексной системы ресурсосбережения на государственном, отраслевом и производственном уровнях как действенного инструмента развития отечественной экономики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ресурсосбережение, вторичные ресурсы, качество продукции, экологическая безопасность, промышленность, экономика и управление, строительство, устойчивое развитие, материальные ресурсы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Цховребов Э.С. Ресурсосбережение: основные этапы становления, теории и методы, тенденции и перспективы развития в промышленности и строительной индустрии России // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 112–158. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.112-158

Resource-saving: main formation stages, theories and methods, tendencies and prospects of development in industry and construction of Russia

Eduard S. Tshovrebov

Research Institute Environmental Industrial Policy Centre (EIPC); Mytishchi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers one of the actual modern ecological, technological, and economic problems. It is saving, rational usage of natural, mineral, and energy resources. Based on an in-depth review of scientific researches and normative documents, the paper suggests ways of solving the resource-saving problem within a context of sustainable development of industry and construction, the formation of “green” economics, provision of ecological safety, scientific and technological development of Russia.

Materials and methods. The paper analysed foreign and domestic publications, normative legal acts, documents on standardization in the field of formation of a conceptual system, legal standards, fundamental theories, concepts, and methods, advanced guidelines of developing the resource-saving, rational usage of natural resources, involving secondary resources in economic turnover. A systemic analysis of methods and algorithms for solving the scientific problem was suggested as a research method.

Results. For the first time in modern scientific literature, the paper gives comprehensive theme review of normative and methodological literature, scientific research works in the field of different aspects of the resource-saving: legal, organizational

and technical, ecological, technological, social and economic ones. The paper reveals and formulates priority guidelines to be thoroughly researched in the future by theoretical and applied sciences. The paper proposes concrete measures of normative and legal regulation, organization, economic incentives of activities in the field of the resource-saving and usage of the secondary resources.

Conclusions. The scientific novelty is concluded in the suggested systemic approach to forming an integrated resource-saving system at the state, sectoral, and production levels as an efficient tool for developing domestic economics.

KEYWORDS: resource-saving, secondary resources, quality of products, ecological safety, industry, economics and management, construction, sustainable development, physical resources

FOR CITATION: Tshovrebov E.S. Resource-saving: main formation stages, theories and methods, tendencies and prospects of development in industry and construction of Russia. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):112-158. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.112-158 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодное сокращение общемировых запасов природно-сырьевых ресурсов способствует повышению значимости вовлечения в хозяйственный оборот вторичных ресурсов, альтернативных источников энергии, организации эффективной системы ресурсосбережения на всех уровнях управления и регулирования хозяйственной деятельности, различных этапах производства и потребления продукции.

Подготовленный автором краткий обзор исторических предпосылок и стадий формирования этой актуальной проблемы, развития ресурсосбережения в качестве производственно-экономической системы, призван способствовать осознанию чрезвычайной важности решения этой проблемы на современном этапе экономического развития нашей страны.

Деятельность человечества на протяжении всей истории сопровождалась изъятием и преобразованием природных ресурсов в конечные продукты потребления в целях обеспечения жизнедеятельности и материального благополучия. Постепенное развитие общественных правоотношений в сфере потребления ресурсов реализовывалось через несколько исторических этапов: начиная с обработки природных ресурсов (камня, древесины), потребления воды, извлечения полезных ископаемых, возделывания земель для поддержания жизни — в эпоху древнего мира; продолжая накоплением богатств и материальных ценностей, в первую очередь, заимствованных у природы (драгоценные металлы, украшения из дерева, камня) в периоды создания и развития государств в эпоху феодализма, а также ранней стадии капитализма; заканчивая современной концепцией нарастающего потребления, оформившейся в середине XX в.

В работах по истории развития экологического права, природоохранной деятельности, стро-

ительных материалов автор статьи совместно с В.М. Исаковым, Е.Г. Величко и др. прослеживает этапы развития законодательных, организационно-экономических и иных мер в области бережного использования природных ресурсов, их экономии и охраны [1–3].

В исследованиях отмечается, что зарождение ресурсосбережения как процесса концептуально обусловлено нехваткой, дефицитом того или иного природного ресурса, материальных средств на определенной географической территории как в мирное, так и в военное время, в ряде случаев связано с религиозными или национальными устоями и обычаями.

Исторически ресурсосбережение ассоциируется, с одной стороны, с *деятельностью по бережному отношению, экономии, неистощительному, рациональному использованию природных ресурсов*: лесных, водных, полезных ископаемых, с другой — *по минимизации или исключению образования в процессе производства и потребления различных отходов, потерь, остатков продукции* путем внедрения каких-либо организационно-технических мер, малоотходных или безотходных технологий [1–3].

Начиная с Древней Руси, основным стратегическим природным ресурсом, подлежащим особой охране, бережному и экономному использованию являлся лес. Правовые документы того времени: Уставы Ярославичей, Соборные уложения XI–XIV вв. предусматривали штрафы за вырубку и поджог лесов, смертную казнь за порубку дубов как священных деревьев или так называемых «засек» — не отделенных от пней живых деревьев, направленных под наклоном в сторону появления вероятного противника, образовывавших мощные непролазные чащи и служивших важным оборонительным сооружением.

Петр I впервые на государственном уровне начал реализовывать централизованную целена-

правленную политику в области охраны и рационального использования лесных ресурсов. По Указу государя к заповедным породам деревьев относились дуб, вяз, клен, лиственница, учреждались постоянные лесозаготовки, а леса России подразделялись на охраняемые и эксплуатируемые. К особо охраняемым относились дубовые рощи, леса, применяемые для кораблестроения и в целях защиты берегов судоходных рек. В XVIII–XIX вв. заложенные Петром I меры по рациональному использованию лесных ресурсов воплотились в различных изданиях Лесного кодекса царской России.

Позднее, уже при советской власти, в июле 1923 г. был принят новый Лесной кодекс, проникнутый народной идеей рационального использования лесных ресурсов на основе планомерных рубок и лесовосстановления. Он также предусматривал категоричность охраняемых лесов, включая памятники природы и заповедники. В Кодексе регламентировались положения по охране лесов и суровые меры ответственности, направленные на пресечение незаконных рубок, квалифицировавшихся как расхищение и уничтожение государственной общенародной собственности. Такие жесткие требования представлялись актуальными в центральных и южных губерниях с уже существенно вырубленными лесными массивами, сгоревшими жилыми и иными постройками в результате гражданской войны, многочисленным населением промышленных городов, где острая потребность в древесине и стремление к бесконтрольным вырубкам было наибольшим. Сберегающие ценный природный ресурс меры нашли отражение в Постановлениях Совета Народных Комиссаров (СНК) «О мерах по упорядочению лесного хозяйства» 1928 и 1931 гг. Лесные ресурсы понесли огромный урон в годы Великой Отечественной войны. Регулировать их восстановление были призваны Постановление Совета Министров СССР «Об упорядочении пользования колхозными лесами и улучшении ведения хозяйства в них» от 1948 г. и ряд других нормативных актов. Дальнейшие меры по рациональному использованию лесов определялись в Основах лесного законодательства СССР и союзных республик [1, 2].

В эпоху Советского Союза основные направления в области охраны и рационального использования водных ресурсов, недр, использования вторичных материальных ресурсов и вторичного сырья устанавливались в законодательстве СССР и союзных республик, указах Президиума Верховного Совета, постановлениях Совмина, союзных стандартах, а в современной России — в Лесном, Водном, Земельном кодексах, федеральных, региональных законах и подзаконных актах, национальных стандартах.

Отправной исторической точкой формирования концептуального подхода к повторному использованию вторичных ресурсов как важного фактора ресурсосбережения на государственном уровне можно считать выдвинутое Петром I впервые в истории России предложение о сборе вторичного сырья. В 1714 г. был издан Указ «О сборе холщового тряпья в Петербургской губернии». В 1720 г. вышел в свет Указ государя «О заготовке рваной мусорной бумаги». Позднее, в XVIII в. эти идеи распространились на черные и цветные металлы, битое стекло, керамику, кости, древесные остатки и пищевые отбросы.

В эпоху индустриального развития ведущих стран, активизации научных исследований в различных областях производства, в XIX в. появлялись новые открытия в области повторного использования различного рода отходов.

В 1842 г. русский химик Н.Н. Зинин открыл способ выделения из составной части перерабатываемой смолы — бензола, специфического вещества — анилина, примененного при производстве красочных материалов. Это направление одновременно развивали европейские ученые. В 1856 г. английский химик В. Перкин сумел создать фиолетовую краску из анилина, полученного при переработке бензола. Эти открытия послужили развитию в Европе лакокрасочной и фармацевтической промышленности с использованием полученных в ходе смежных отраслей производства побочных продуктов (каменноугольной смолы, деревообработки и др.).

В том же столетии исследователь-химик немецкого сахарного завода А. Франк после всестороннего анализа образующихся в процессе добычи каменной соли отходов обнаружил в их составе соли калия, повторно применимые после соответствующей переработки для получения карбоната калия (поташи), сернокислого и хлористого калия, магнезии, соляной кислоты. К 1872 г. в Германии функционировало более 30 заводов по переработке солевого сырья и выпуску калийных соединений для нужд промышленности, а также в качестве удобрений для сельского хозяйства [4].

Большое значение переработке остатков производства придавал Д.И. Менделеев. Он обращал внимание на то, что в результате утилизации отходов происходит превращение бесполезного материала в ценные по свойствам товары. Фактически идея сберегающей ресурсы безотходной технологии была изложена великим русским ученым еще в 1885 г. в опубликованной в журнале «Новь» статье «Письма о заводах»: «...множество технологических производств имеют так называемые отбросы, т. е. совершенно пренебрегаемые в экономическом отношении результаты химических превращений, которые, однако, сами по себе иногда становятся со временем

исходною точкою нового производства весьма большой важности. Если непрерывность есть первый принцип заводского дела, то вторым должно считаться, по моему мнению, отсутствие выбросов...».

Д.И. Менделеев подчеркивал: «...Особенное значение переделка отходов имеет при множестве заводских производств, так как иногда самая масса отходов составляет большую долю от добываемого продукта...». Предложенные ученым различные методы переработки отходов: стеклянного боя — в товарное стекло, переделка после очистки и сортировки текстильного тряпья в искусственную шерсть, костей — в клей и фосфористые удобрения, образующиеся при сжигании каменного угля деготь и смолу — для пропитки картона (кровельный толь) сыграли большую роль в становлении как самой идеи ресурсосбережения, так и в развитии производств по использованию вторичного сырья из отходов в царской России [2, 3].

На рубеже середины XIX – начала XX в. и в России, и в европейских странах достаточно результативно реализовывались системы сбора, заготовки и переработки вторичного сырья.

В России сбор тряпья, битого стекла, костей, брошенных металлических изделий для последующей заготовки осуществлялся на городских свалках, либо «на крик» с домовых территорий «крючочниками» с мешками на спине. Далее собранное сырье мелкими партиями продавалось так называемым «мелким тряпичникам», далее — «гуртовщикам», сортировавшим, складируя утиль и в навигацию направлявшим такое вторичное сырье уже крупными партиями речным транспортом на городские ярмарки, либо напрямую на заводы и фабрики. К примеру, в 1913 г. было заготовлено порядка 100 тыс. т различного тряпья, из которых экспортировано более 15 тыс. т. При этом до 60 % собранного вторичного сырья направлялось в бумажное производство, 9 % — в кровельное (изготовление рубероида, толя), 3 % — в шерстяное, 15 % — в ватное и ветоши (обтирочных концов) [4].

В Германии в этот исторический период впервые в мире стала применяться механизированная сортировка городских отходов с целью выделения утильного сырья. В Мюнхене посредством специальной установки — «трясущегося сита» удаляли сухую грязь, песок, глину, золу, пыль, шлак, небольшие камни, иные мелкодисперсные частицы, используя затем для подсыпки неровностей дорог. Далее, на простейшем конвейере из очищенных отходов вручную выбирались стекло, обрывки ткани, бумаги, кости, металл. После обработки (сушки, дезинфекции) бумага в кипах перевозилась на бумажные фабрики, кости дробились и направлялись на мыловаренное и клеевое производство, горючие

остатки — на отопление котлов зданий, тряпье — на текстильные фабрики, металл — перекупщикам, пищевые отбросы — на сельскохозяйственные земельные участки. Позднее в Мюнхене и в других немецких городах начала функционировать система раздельного сбора отходов у населения: в установленные в каждом домовладении три ящика собирались соответственно пищевые остатки, зола и остальной твердый мусор: битые стекло и керамика, использованные или отработанные металлические изделия, а также мелкое тряпье и бумага. Постепенно во Франции, Англии также появились системы раздельного сбора мусора и механизированные способы его сортировки [4].

После провозглашения советского государства одним из первых правовых актов того времени стал Декрет Совета Народных Комиссаров от марта 1918 г., касающийся вопросов использования бумажных остатков, в соответствии с которым устанавливалось, что при накоплении на предприятии, в учреждении или организации более 30 пудов бумажных остатков информация должна передаваться в отдел утилизации негодных предметов при местном совете народного хозяйства для последующей передачи заготовительным организациям. В 1923 г. при Высшем совете народного хозяйства (ВСНХ) РСФСР организуется акционерное общество «Тряпье-лоскут» для заготовки вторсырья для текстильной промышленности, при Госторге РСФСР в целях заготовки сырья для мыловаренного и клеевого промышленного производства — «Тряпье-кость». В 30-е гг. прошлого столетия в СССР и западных странах начала активно развиваться система раздельного сбора отходов у населения и организации пунктов сбора вторичного сырья [5].

В начале 30-х гг. американский президент Г.К. Гувер поддержал направление «превращения в настоящее золото ... всякого рода ничего не стоящей вещи», передав эту идею на реализацию в так называемое «Бюро стандартов» в Вашингтоне. Результатами работы указанной структуры стало увеличение использования вторичного сырья для нужд промышленности и сельского хозяйства США с одновременным сокращением изъятия ряда природных ресурсов, в первую очередь, леса [6].

Во второй половине XX в. одновременно с послевоенным восстановлением экономики ведущих мировых стран, ростом промышленного производства и многократным увеличением потребления природных ресурсов стала формироваться концепция ограниченности ресурсов. Пришло общее понимание того, насколько недостаточны фактические объемы оставшихся невозобновляемых природных ресурсов. Прошедшая по всему миру волна экономических и связанных с ними политических кризис-

сов, вызванных резким увеличением спроса на ряд дефицитных природных ресурсов, стремительный рост цен на них наглядно показали опасность такого положения для существования, стабильности, устойчивости любого государства. Политические манипуляции с природными ресурсами, а именно административные ограничительные меры доступа для соперничающих за господство в геополитическом плане стран капиталистической и социалистической политических систем, не добавили стабильности для общемирового порядка и глобального экологического равновесия [7, 8].

В 1955 г. в США экономист-аналитик Виктор Лебов писал: «Наша чрезвычайно продуктивная экономика ... требует, чтобы мы сделали потребление образом жизни, чтобы мы превратили покупку и использование товаров в ритуалы, чтобы мы искали душевного удовлетворения, удовлетворения нашего эго в потреблении. Нам надо потреблять вещи, сжигать, замещать и отказываться от них с всевозрастающей скоростью».

Высокая значимость данного высказывания и в наши дни предопределена растущим потреблением товаров, продукции и услуг, что влечет за собой пропорциональное увеличение объемов используемых ресурсов. Важным экономическим двигателем ресурсосбережения становятся технологические и следующие за ними финансово-экономические потери.

В 1971 г. международной группой ученых под руководством американского специалиста Дж. Форрестера по заказу Римского клуба осуществлены комплексные исследования наиболее важных сторон развития мировой цивилизации. По результатам исследований выявилась динамика процессов, обусловленных действием «петли обратной связи: исчерпание ресурсов — недостаток средств, вкладываемых в охрану окружающей среды и рециклинг — ухудшение качества жизни и здоровья людей — деградация техносферы и всей социально-технической системы человечества — исчерпание ресурсов». В итоге был дан неутешительный прогноз о неизбежном через 50–70 лет истощении, дефиците стратегических запасов природных ресурсов, в первую очередь, воды. Аналогичные исследования продолжают до сих пор учеными США, Японии, Германии и других стран [9].

На рубеже 70–90 гг. прошлого столетия во всем мире росло осознание того, что ресурсосбережение, рациональное экономное использование природных ресурсов становятся одними из основных задач в ходе реализации курса ведущих стран на устойчивое развитие. Активизация экологического самосознания общества, политической воли в плане борьбы за экологию, в первую очередь, со свалками отходов,

постепенно стали приводить во многих странах к пересмотру их правительствами системы обращения с природными ресурсами, введению ограничений на объемы потребления, регулированию и стимулированию использования вторичных ресурсов.

Известный исследователь Сюзанна Лундстром выделила в экономике стран различные циклы с учетом уровня потребления природных ресурсов и существующей системы их использования. Она обращает внимание на то, что любая страна, даже изначально не имеющая природных ресурсов, испытывающая их нехватку и дефицит, может реализовывать эффективную экономическую политику при условии превышения экспорта продукции над импортом потребляемых ресурсов. При построении экономического уклада на экспорте ресурсов неизбежно возникают социально-экономические противоречия и низкая эффективность производства в силу отсутствия стимулов для развития ресурсосбережения в добывающих отраслях и необходимости инновационного интенсивного развития промышленного производства [10]. Описанные в научных трудах С. Лундстром теоретические положения по эффективности ресурсосбережения стали особенно актуальны в наше время для поиска перспективных путей модернизации и совершенствования современной сырьевой экономики России.

Ряд зарубежных ученых-экономистов XX – начала XXI в. обращают внимание на важную роль инноваций в становлении ресурсосберегающего уклада экономики. В работах Трайтенберга, Куна, Доси, Роба, Хелпмена, Олссона обозначена роль видов технологических инноваций: потенциальные, интенсивные, экстенсивные, революционные, аномальные и другие в области использования ресурсов. В зависимости от преобладающих типов инноваций ими предлагалось внедрять разнообразные ресурсные модели, в которых определены основы функционирования экономики, направленной на сокращение изъятия природных ресурсов, ориентацию на интенсивное развитие ресурсосбережения во всех отраслях и сферах экономики [8, 11].

Одной из таких моделей является «безотходное производство». В развитие идеи ресурсосбережения в XX в. термин «безотходная технология», сформулированный советскими, российскими учеными И.В. Петряновым–Соколовым и Н.Н. Семяковым, стал активно применяться в литературных источниках в России и за рубежом.

По замыслу авторов идеи, теория безотходных хозяйственных процессов основывается на следующих концептуальных положениях:

- природные ресурсы должны добываться один раз для производства всех возможных продуктов, а не каждый раз для получения каждого из них;

- создаваемые продукты должны иметь форму, позволяющую после использования по прямому назначению рентабельно превращать их в исходные элементы нового производства [12].

Понятийный аппарат в данной области был закреплён в соответствии с решением Европейской экономической комиссии ООН и Декларацией о малоотходной и безотходной технологии, принятой в 1979 г., на совещании по общеевропейскому сотрудничеству в области охраны окружающей среды.

Уже позднее, с учетом означенных идей и теорий, сформировались общемировые концепции: «зеленая» экономика, «zero waste», «экономика замкнутого цикла», «зеленое» строительство, расширенная ответственность производителя (РОП), «RRR (предотвращение образования отходов, повторное использование, переработка во вторичные ресурсы)» [13–17].

Вопросы формирования экономического механизма эффективного использования ресурсов, методологии рационализации ресурсопользования, выявления и ликвидации потерь ресурсов, снижения материалоемкости продукции, экономико-математического обоснования развития безотходных производств затрагивали в своих работах [18–25] известные советские ученые А.Г. Аганбегян, М.А. Виленский, К.Г. Гофман, В.М. Андрианов и ряд других авторов. В эпоху советской экономики особое внимание обращалось на планирование внедрения технологий и технологических процессов, обеспечивающих проведение государственной ресурсосберегающей политики; расширение ассортимента выпуска новых качественных строительных и иных материалов, изделий с использованием вторичных ресурсов; разработку, внедрение нового ресурсосберегающего оборудования.

Большое значение в эпоху советской административно-командной плановой экономики играла «политическая воля» конкретных прогрессивно мыслящих руководителей советского государства в решении тех или иных народнохозяйственных вопросов. Можно отметить, что родоначальником комплексной системы сбережения ресурсов как важнейшей государственной задачи в 1970–1980 гг. являлся председатель Совмина СССР А.Н. Косыгин.

В 1975 г. в целях развития, активизации и консолидации научных и прикладных исследований в области ресурсосбережения и использования вторичных ресурсов Постановлением Совета Министров СССР «О мерах по укреплению материально-технической базы организаций и предприятий по заготовке, обработке и переработке вторичного сырья системы Госснаба СССР и Центросоюза» образован Всесоюзный институт вторичных ресурсов (ВИВР). Статус головной научной организации

подкреплялся мощной производственно-технической базой. Учеными и специалистами союзного научного учреждения формировались концепции, стандарты, методики по вопросам вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, сбора и переработки вторичного сырья. Разрабатывались и успешно внедрялись инновационные технологии в данной области, охватывающие все сферы материального производства и стадии потребления продукции, создавались новые виды материалов и продукции с использованием вторичных ресурсов.

С учетом вклада науки в практическое решение проблем ресурсосбережения и использования вторичного сырья, создания и внедрения современных прогрессивных концепций, планов, технологий, организационно-технических мероприятий, методических рекомендаций, нормативов, стандартов в 1970–1980 гг. в советском государстве сложилась достаточно эффективная для планового народного хозяйства система ресурсосбережения и обращения вторичных ресурсов.

При управлениях материально-технического обеспечения министерств организовывались подразделения по регулированию, учету обращения вторичных ресурсов. В эпоху дефицита некоторых видов запасных частей, станков, продукции для отраслевых предприятий действовала жесткая система контроля сдачи отработанных материалов и изделий, служащих вторичным сырьем: моторных масел, покрышек, аккумуляторов, упаковки, макулатуры, металлолома и т.п. С ведомств спускались лимиты на сдачу указанных видов отходов, не выполнив которые, предприятия могли лишиться права на получение новых материалов, оборудования, техники. Пищевые продукты, промтовары, ГСМ отпускались в сменную оборотную тару или утилизируемую упаковку. В городах и иных населенных пунктах эффективно работала централизованная система сбора вторичного сырья у населения (стеклотара, металлолом, текстиль, макулатура), подкрепленная высокими материально-финансовыми стимулами. Практически каждый житель огромной страны так или иначе, на производстве или в быту участвовал в реализации этой государственной централизованной системы, имевшей высокую результативность, свидетельством чему служили высокий процент оборота вторичных ресурсов, крайне малый уровень захораниваемых отходов, незначительное количество свалок мусора [1].

После перехода к рыночным отношениям в России большинство изложенных в этих работах методологических подходов и принципов в части планирования ресурсосберегающих мероприятий и производств не нашли своего применения в новом капиталистическом экономическом укладе.

Одновременно прекратила свое существование централизованная плановая система управления, организации сбора, оборота, использования вторичных ресурсов. Негативные последствия этих процессов предопределили угрожающую для экономики и экологии РФ ситуацию с захлыванием территории страны опасными отходами, загрязнением земельных, водных, лесных ресурсов, чрезвычайно высокой нагрузкой на окружающую среду в связи с ускоренными темпами изъятия природных ресурсов, их бесконтрольным использованием. До сих пор никакие «мусорные реформы» не могут обеспечить эффективное решение этих актуальных проблем.

В эпоху рыночных отношений основным критерием эффективности служит получение максимальной прибыли при минимальных материальных и иных затратах. Неотъемлемые черты рыночной экономики: ограниченность денежных ресурсов, конкуренция, высокие требования к качеству, экологичности, безопасности выпускаемой продукции ставят новые задачи в области ресурсосбережения. Постоянно растущая конкуренция, а также значительный удельный вес материальных затрат в себестоимости продукции заставляет бизнес минимизировать издержки производства, проводить мероприятия по снижению себестоимости продукции за счет оптимального использования ресурсов в целях повышения рентабельности производства и максимизации прибыли. С учетом этого в современном мире формируются научные и практические подходы к вопросам энерго- и ресурсосбережения, использования вторичных ресурсов.

По мнению ряда зарубежных и отечественных авторов [26–29], ресурсосбережение реализуется на производстве, в строительстве, иных сферах путем внедрения наилучших доступных технологий, позволяющих в максимальной степени использовать потенциал ресурсов путем их многократного повторного использования, осуществляя переход к циклической экономике — экономике замкнутого цикла в виде системы рыночных отношений, в которой продукт на последнем этапе жизненного цикла его использования рассматривается не как отход, а как вторичное сырье или энергия для повторного вовлечения в хозяйственный оборот.

Российская Федерация в рамках ориентации на устойчивое социально-экономическое, промышленно-технологическое, экологическое и научно-техническое развитие руководствуется семнадцатью глобальными целями, провозглашенными ООН в 2015 г. в «Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года»¹. Закрепленный

в международном документе и общепринятый в мировом сообществе комплексный системный подход в области обеспечения рациональных моделей потребления и производства, рационального использования вод и управления лесами призван реализовать повышение качества жизни населения и обеспечить устойчивое развитие в кратко-, средне- и долгосрочной перспективе.

С учетом усиливающихся глобальных и локальных экологических проблем, угрожающих развитию всего человечества, ежегодно растущей нехватке невозобновляемых природных ресурсов, в нынешнем столетии «зеленая» экономика признана наиболее эффективной формой практической реализации идеологии устойчивого развития, повышения качества жизни людей и окружающей среды. Стратегия и концептуальные основы «зеленой» экономики, рассматриваемые в работах С.Н. Бобылева, В.И. Теличенко, В.М. Захарова, Г.С. Никитина, В.С. Осьмакова, Д.О. Скобелева, С.М. Никанорова, Л.Н. Медведева, К.Ю. Козенко, О.П. Комарова и ряда других ученых, базируются на экологизации экономики и промышленной сферы, улучшении состояния окружающей среды, снижении антропогенного воздействия на природные объекты, внедрении «зеленых» технологий, рациональном, экономном использовании природных ресурсов, максимально технически возможном, экологически допустимом, экономически целесообразном извлечении вторичных ресурсов из выбросов, сбросов, перерабатываемых отходов с последующим вовлечением их в хозяйственный оборот, энерго- и ресурсосбережение во всех сферах жизнедеятельности [30–34].

Исследователи И.А. Родионова и С.А. Липина считают, что «...переход от традиционной модели экономического роста к «зеленой экономике» — это общемировой тренд, определяющий устойчивость развития не только отдельных национальных экономик, но и всей планеты в целом, а продвижение «зеленой экономики» — это основной путь развития...» [35].

В работах М.П. Чердаковой, Я.Д. Вишнякова, Б.И. Волостнова, С.П. Киселевой, В.В. Полякова, И.Н. Голуб, Р.Л. Агабекян, И.П. Богомоловой подчеркивается, что формирование экономически эффективной системы ресурсосбережения представляет собой комплексную проблему, включающую в себя различные аспекты: правовой, социальный, технологический, финансово-экономический, экологический, ресурсный, инновационный, научно-технический. По их мнению, государственное управление и регулирование ресурсосбережения должно охватывать все эти аспекты в комплексной системе через общепринятые инструменты регулирования хозяйственной деятельности, включая мероприятия

¹ Цели в области устойчивого развития до 2030 года. URL: <http://scientifically.info/publ/5664>

по снижению потребления природных ресурсов, энерго- и ресурсосбережению на всех стадиях производства и потребления продукции, энергии [36–39].

При этом отмечается, что при наличии в нашей стране значительных запасов природных ресурсов, полезных ископаемых экстенсивный характер изъятия, потребления природных ресурсов и, соответственно, состав приоритетных видов экономической деятельности будут определяться исключительно исходя из коммерческих интересов бизнеса.

Проведенный рядом авторов [40–46] анализ экономической оценки использования вторичных ресурсов, ресурсосберегающих мероприятий и технологий в разрезе регионов, отраслей экономики, промышленных предприятий позволяет выделить основные сложности, сдерживающие результативность политики ресурсосбережения:

- несовершенство нормативно-правовой базы, государственного регулирования, организации этих мер, отсутствие единого законодательного акта в области ресурсосбережения и обращения вторичных ресурсов;
- непринятие мер государственной поддержки развития и внедрения ресурсосберегающих технологий, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, в том числе форм экономического стимулирования применения организационно-технических мероприятий, экономии воды, энергии, материалов и сырья, снижения материало- и ресурсоемкости производства, экологической модернизации производства, выпуска качественной экологичной продукции из вторичного сырья;
- неразвитость инфраструктуры по утилизации отходов, раздельному сбору вторичного сырья у населения и хозяйствующих субъектов;
- невысокая стоимость невозобновляемых природных ресурсов, не способствующая стремлению бизнеса к поиску и внедрению альтернативных технологий выпуска продукции с использованием вторичных ресурсов.

К этому следует добавить низкий уровень регулирования и контроля безотходности производства, качества выпускаемой продукции, уровня вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот. Ни бюджетам различных уровней, ни госкорпорациям, ни частным компаниям не имеет экономического смысла вкладывать инвестиции в проекты, которые не принесут экономического результата. Нерешенные на государственном уровне вопросы нормативно-правового обеспечения, управления, регулирования и развития экономического механизма ресурсосбережения, обращения вторичных ресурсов в настоящее время представляют собой острые актуальные проблемы в области экологии и экономики России.

Одна из главных причин недостаточной научной проработанности и практической значимости исследований в области ресурсосбережения, на взгляд автора статьи, состоит в том, что в большинстве отечественных исследований ресурсосбережение рассматривается теоретически под технологическим или экологическим углом зрения без увязки с особенностями современной экономической системы хозяйствования.

Вместе с тем сравнительный анализ зарубежных источников показал, что среди экономически развитых стран весомых и эффективных результатов в области рационального природопользования, сбережения и экономного использования материальных и энергетических ресурсов, вовлечения вторичных ресурсов в производственные процессы достигли те из них, в которых ресурсосберегающая политика является одним из стратегических приоритетов устойчивого развития общества и государства, а в некоторых — одной из общеполитических национальных идей [47–52].

Актуальность и практическая значимость для экономики страны рассматриваемой проблемы определила цель настоящего исследования — выработку на основе всестороннего обширного тематического обзора научно обоснованных предложений в области перспективных решений по формированию комплексной экономически эффективной системы ресурсосбережения на различных уровнях: государственном — управлении, организации, регулировании, создании условий для эффективного внедрения ресурсосбережения, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, планировании и реализации мер по сохранению стратегических запасов невозобновляемых природных ресурсов и их рационального использования как факторов экологической и экономической безопасности, устойчивого инновационного социально-экономического и научно-технического развития России; отраслевым — как фактора экономического роста отраслей и секторов экономики; хозяйствующего субъекта — как фактора повышения эффективности, материало- и ресурсоемкости, рентабельности производства и выпуска качественной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многомерность и неоднозначность различных мнений, заключений, трактовок, выводов ученых и специалистов, применяющихся для оценки ресурсосбережения как понятия, категории, процесса, системы, научного направления потребовали привлечения комплексного подхода, включающего сбор обширного материала из опубликованных литературных источников, его систематизацию и анализ.

Это позволило выявить ключевые опорные точки соприкосновения науки и практики в области права, экономики, организации и управления, техники, технологий, экологии, выявить в ряде исследовательских направлений недостаточный уровень разработанности рассматриваемой в работе проблемы, наиболее перспективные концепции и пути развития ресурсосбережения на всех стадиях и уровнях хозяйственной деятельности и материального производства.

Проведению впервые публикуемого в современной научной литературе обширного тематического обзора и системного анализа проблемы ресурсосбережения предшествовали поиск и тщательный отбор релевантной литературы. Первостепенным этапом исследования явилась выработка системы обоснованных критериев отбора литературных источников. С учетом поставленной в исследовании задачи — поиска перспективных научных решений по формированию комплексной системы ресурсосбережения на различных уровнях управления: государственном, отраслевом, производственном как фактора устойчивого социально-экономического развития России, по замыслу автора, выбранные критерии должны удовлетворять наиболее полному, всестороннему, объективному освещению рассматриваемой в исследовании предметной области при рациональном и оптимальном объеме реализации тематического исследования.

С учетом актуальности, научной новизны, изученности, практической значимости предмета исследования, для реализации поставленных задач в составе критериев отбора литературы выбраны:

- по основным направлениям обзора, позволяющим в полной мере изучить, систематизировать, проанализировать предмет исследования настоящей работы: исторические предпосылки, история становления и развития направления; понятийный аппарат; рамки предметной области, взаимосвязь с другими научно-практическими исследовательскими направлениями; правовые основы; теории и концепции; современные актуальные проблемы и тенденции; экономические, экологические, социальные, научно-технические, организационно-правовые, управленческо-регулятивные, технологические аспекты исследуемой проблемы; перспективы реализации направления в России для обеспечения устойчивого социально-экономического развития;
- по тематике, предметным областям, направлениям, связанным с предметом исследования: отечественные и зарубежные теории и концепции ресурсосбережения, рационального, экономного использования природных, материальных и энергетических ресурсов; «зеленая экономика»; ресурсосбережение, энергосбережение, качество продукции;

«зеленое» строительство; экономика замкнутого цикла; ресурсосберегающие мероприятия и технологии; снижение материальных потерь на производстве; повторное использование отходов; вовлечение вторичных ресурсов и вторичного сырья из обработанных отходов в хозяйственный оборот; повторные и оборотные системы водопользования и водосберегающие мероприятия; минимизация и уменьшение потерь в процессе обращения строительной и иной продукции (хранении, складировании, транспортировании, использовании, потреблении); экономическая эффективность ресурсосберегающих мероприятий; государственное регулирование в области использования природных ресурсов; экономические механизмы и стимулы эффективного использования ресурсов;

- по форме: международные правовые акты; российские: законодательные и подзаконные акты (постановления, распоряжения Правительства РФ, органов государственного управления на федеральном и региональном уровне); документы по стандартизации (государственные и отраслевые стандарты, технические условия и регламенты, рекомендации); нормативно-методические документы (нормативы, правила, методики); научная литература (публикации в научных отечественных и зарубежных журналах, диссертационные исследования, научно-исследовательские работы);

• по срокам публикации: ограничения не устанавливались в силу наличия исторического обзора рассматриваемой тематики, с учетом описания положительного опыта решения проблем ресурсосбережения в нашей стране в предыдущем столетии; однако при этом оценка перспектив развития сферы ресурсосбережения и обращения вторичных ресурсов в нашей стране рассматривается исключительно с учетом функционирования современной системы хозяйствования — рыночной экономики;

- по качеству источников: первоочередному рассмотрению и анализу подлежали актуальные современные зарубежные и отечественные оригинальные публикации из научных журналов, включенные в глобальные индексы научного цитирования, диссертационные исследования и научно-исследовательские работы, при необходимости более обширного изучения всех сторон и аспектов изучаемой проблемы ход исследования дополнялся всеми выявленными публикациями научно-практической направленности, в том числе из интернет-источников по означенной тематике;

• по количеству исследуемой литературы — не менее 100 литературных источников, из них не менее 50 опубликованных в зарубежных журналах.

В работе углубленно не рассматриваются наилучшие доступные технологии энерго-, водосбере-

жения, «зеленого» строительства, акцент делается на тематический обзор поставленной проблемы в целом, основных направлений, путей ее решения применительно к области экономических, экологических, организационно-управленческих правоотношений.

В качестве метода исследования применяется системный анализ способов, алгоритмов решения поставленной в исследовании научной проблемы на основе проведенного всестороннего обширного тематического обзора литературных источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя в настоящей работе *сущность и содержание правовой и экономической категории «ресурсосбережение»* следует отметить, что среди российских и зарубежных исследователей рассматриваемой проблемы долгие годы существует чрезвычайно широкий разброс мнений, приводящий к неоднозначному толкованию данного понятия, отсутствию закреплённой на законодательном уровне общепринятой терминологии, не полному охвату факторов и критериев, определяющих ресурсосбережение как категорию экономики и права. Несмотря на созданный различными учеными значительный научный и теоретический задел в этой специфической предметной области, охватывающей все сферы общественных правоотношений: экономические, социальные, экологические, технические и иные, ресурсосбережение в России до настоящего времени остается весьма сложно реализуемым проблемным видом хозяйственно-экономической деятельности и недостаточно исследованной областью знаний.

Сложившаяся ситуация обусловлена также и тем, что основное внимание в работах ученых и специалистов уделено технологическому и экологическому аспектам использования природных, материальных и энергетических ресурсов, их хозяйственному и бухгалтерскому учету. При этом актуальные для нашей страны организационно-экономические вопросы ресурсосбережения, его практического эффективного внедрения и стимулирования в условиях рыночной экономики, проблемы управления и регулирования обращения вторичных ресурсов на уровне государства в целом, отраслей и секторов экономики рассматриваются, как правило, без учета комплексного межотраслевого, межведомственного и межсубъектного взаимодействия в данной области, взаимоувязки интересов всех сторон российского общества по решению этой актуальной проблемы.

Несмотря на то, что в исследуемой отечественной научной литературе вопросам ресурсосберегающих технологий, снижения расходов за счет эконо-

мии материальных ресурсов уделяется значительное внимание, по результатам сбора информации в означенной предметной области, ее обобщения, сопоставительного анализа, не выявлено в полном объеме достоверных сведений, какие из научных разработок в области ресурсосбережения принесли реальный осязаемый социально-экономический, экологический, ресурсный эффект в результате их внедрения в отраслях и секторах экономики, промышленных комплексах.

Это в первую очередь касается разработки и закрепления в правовых актах общепринятого понятийного аппарата, стратегии развития всего направления в целом, а также механизма эффективной поэтапной практической реализации данного перспективного для российской экономики направления. Остаются не в полной мере разработанными и требуют дополнительных исследований вопросы формирования критериев ресурсосбережения, комплексной оценки, регулирования и управления ресурсоемкостью продукции, обращения вторичных ресурсов, экономического стимулирования экономного рационального использования материальных и энергетических ресурсов в процессе производства и потребления продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

Анализируя научно-методические подходы авторов к оценке понятия «ресурсосбережение», следует выделить три основных направления предметной области исследования: экономическую, технико-технологическую и экологическую, при этом объектом исследования служат материальные, энергетические, трудовые, природные, технические ресурсы.

Систематизация предлагаемых подходов к экономической составляющей понятия «ресурсосбережение» в виде процесса в опубликованных отечественных работах [53–94] приведена на рис. 1.

Научные подходы к определению понятия «ресурсосбережение»

Один из основоположников экологической теории Н.Ф. Реймерс рассматривает сущность ресурсосбережения через призму понятия «ресурсосберегающей технологии», понимая под ней «производство и реализацию конечных продуктов с минимальным расходом вещества и энергии на всех этапах производственного цикла (от добывающих до сбытовых отраслей), с наименьшим воздействием на человека и природные системы» [53]. Ученым подчеркивается необходимость учета всех расходов, возникающих на промежуточных этапах производства в расчете на единицу производимой продукции или на единицу ее эффективности. По его мнению, обязательным условием внедрения ре-



Рис. 1. Ресурсосбережение как процесс в экономике

Fig. 1. Resource-saving as a process in economics

ресурсосберегающей технологии является требование сокращения использования природных ресурсов, минимизации негативного воздействия на природную среду, определяемые способами производства продукции и возможностями перехода к выпуску новых изделий на основе «миниатюризации и технической дополнителности».

Обращая внимание на полноту, четкость и емкость сформулированного Н.Ф. Реймерсом понятия «ресурсосберегающая технология», по мнению большинства исследователей, ресурсосбережение не может быть ограничено только технологическими рамками, поскольку, кроме «...производства и реализации конечных продуктов...», оно включает в себя нормативно-правовые, социально-экономические, организационно-управленческие, экологические и иные аспекты, выражая, по сути, все стороны современных общественных правоотношений.

Анализ литературных источников, их систематизация и обобщение взглядов ученых, специалистов показали отсутствие единого общепринятого подхода к ресурсосбережению как к правовой или экономической категории. Основной научный подход к определению понятия «ресурсосбережение» сводится к рассмотрению его как комплекса, совокупности или системы взаимосвязанных мероприятий, процесса, результата или показателя.

Комплексность ресурсосбережения на различных уровнях (отраслевом, производственном) подчеркивает исследователь И.И. Гизятов. По его мнению, этот процесс осуществляется путем реализации «организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема потребляемых ресурсов при сохранении полезного эффекта их использования» [54].

Аналогичную позицию представляют в своих трудах И.В. Алексеев, Э.В. Гирусов и ряд других авторов [55, 56]. С точки зрения авторов, ресурсосбережение представляет собой совокупность мер по экономному и эффективному использованию всех факторов производства, общее свойство которых состоит в потенциальной возможности их участия в производстве (производственные ресурсы) и в потреблении (потребительские ресурсы), при этом ресурсосбережение означает «комплексное использование всех видов ресурсов (материальных, трудовых, природных, финансовых и других)» для решения задач экономического и социального развития.

Комплексность процесса ресурсосбережения выделяют в работах Д.Н. Дорогутина, С.В. Тепаева, Н.И. Тюжакаева, характеризуя его в качестве деятельности (экономической, информационной,

организационно-технической, научно-практической), методов, процессов, комплекса различных взаимосвязанных между собой мер и мероприятий, сопровождающих все стадии жизненного цикла изделий и направленных на рациональное использование и экономию ресурсов [57, 58]. Представленная авторами характеристика процесса рационального использования ресурсов носит экологическую смысловую нагрузку: «достижение максимальной эффективности использования ресурсов в хозяйстве при существующем уровне развития техники и технологии с одновременным снижением техногенного воздействия на окружающую среду», а понятие «экономное расходование ресурсов» — экономическую: «относительное сокращение расходования ресурсов, выражающееся в снижении их удельных расходов на производство единицы конкретной продукции, выполнение работ и оказание услуг установленного качества с учетом социальных, экологических и прочих ограничений». Подчеркивается, что исходными предпосылками для формирования и осуществления ресурсосберегающей идеи является непрерывное возрастание потребления сырья и материалов в мире [58].

Выделяя важный экологический аспект процесса ресурсосбережения, цель которого способствовать снижению негативного воздействия на окружающую среду, С.В. Пантелеев определяет ресурсосбережение как системный процесс сокращения ресурсоемкости продукции при не снижающемся ее качестве, путем реализации системы организационно-экономических, технико-технологических, научно-технических, нормативно-правовых и социально-экологических мер для повышения эффективности производственно-хозяйственной деятельности, при условии безопасности окружающей среды и человека [59].

Следует констатировать, что значительное количество исследователей-экономистов сходятся во мнении, что ресурсосбережение является системой мер, методов, мероприятий или факторов [44–67].

Результаты проведенной автором работы по систематизации подходов к оценке понятия «ресурсосбережение» представлены в табл. 1.

Большая группа авторов в опубликованных работах отмечает, что технологии, меры, мероприятия по ресурсосбережению должны быть направлены на наиболее эффективное, оптимальное, рациональное использование всех видов ресурсов.

Ф.М. Черномуров, В.П. Ануфриев, А.Г. Мокроносов, Н.Г. Михайлов, Л.М. Теслюк подчеркивают необходимость выработки такого организационно-управленческого подхода, при котором цели экономического механизма ресурсосбережения будут со-

впадать с целевыми показателями экономического развития производственного предприятия как субъекта экономической деятельности, а также всего коллектива предприятия [64, 65].

Авторы подчеркивают, что ресурсосбережение как комплекс задач, принципов и направлений их реализации, имея самостоятельное технико-экономическое значение, является неотъемлемой частью хозяйственного механизма в целом — как на отраслевом уровне, так и для каждого хозяйствующего субъекта в отдельности. По мнению авторов, все элементы механизма ресурсосбережения должны быть увязаны в единой производственно-технической, организационно-экономической, цикличной ресурсной системе и взаимодействовать в реальном режиме функционирования хозяйствующего субъекта.

А.М. Мантулин под ресурсосбережением представляет комплексное воздействие на процессы формирования и использования всех видов имеющихся ресурсов [66]. И.П. Богомолов и А.М. Мантулин в 2017 г. в работе «Факторы и принципы ресурсосбережения» выделили основные принципы сбережения ресурсов в процессе производственной деятельности хозяйствующего субъекта: стратегическое развитие предприятия, целесообразность, доступность минимальных затрат, человеческое участие, достаточность информации, улучшение условий труда. По их мнению, такие принципы служат первичной основой управленческого процесса на предприятии в части эффективности ресурсопотребления.

Ряд исследователей характеризуют ресурсосбережение с эколого-ресурсной и одновременно экономической точек зрения как процесс рационального использования ресурсов [53, 60, 63, 68, 71, 73, 78, 79, 81], оптимизации затрат ресурсов [72, 74, 77] либо экономии ресурсов [62, 63, 67, 73, 76, 79]. На необходимость внедрения ресурсосберегающих технологий обращается внимание в работах [53, 57, 73, 74, 77].

Большую кропотливую работу по систематизации понятия «ресурсосбережение» провели исследователи М.А. Шумаев в монографии «Теория и практика ресурсосбережения» [93], вышедшей в 2016 г. и С.В. Пантелеев в 2017 г. в авторском труде по проблеме теоретических основ ресурсосбережения [59].

По итогам проведенного анализа трудов отечественных авторов можно рассматривать структуру экономической категории «ресурсосбережение» в виде описанных выше взаимосвязанных составляющих: содержания, формы, процесса, целей и результатов ресурсосбережения.

Табл. 1. Результаты систематизации подходов отечественных авторов к формированию понятийного аппарата и сущности ресурсосбережения с учетом различных аспектов**Table 1.** Results of systematizing domestic authors' approaches to forming a conceptual system and resource-saving essence with due account for different aspects

Сущность авторского подхода к рассматриваемому аспекту ресурсосбережения / The essence of the author's approach to considered resource-saving aspect	Авторы и ссылки / Authors and references
А. Ресурсосбережение как система / A Resource-saving as a system of	
Организационно-экономических, технико-технологических, нормативно-правовых и социально-экологических инновационных мероприятий / Organizational and economic, engineering and technological, normative and legal, social and ecological innovation measures	И.Л. Воротников [60] / I.L. Vorotnikov [60]
Технологических, научно-технических и организационно-экономических мер / Technological, scientific and engineering, organizational and economic measures	А.С. Рощектаев [61] / S.A. Roshchekhtayev [61]
Организационных, экономических и технических мер / Organizational, economic and engineering measures	А.С. Попов [62] / A.S. Popov [62]
Организационных, экономических, экологических, технических мер / Organizational, economic, ecological and engineering measures	А.С. Савенко [63] / A.S. Savenko [63]
Развивающихся по своим законам нормативно-правовых, научно-технических, социально-экономических, информационно-образовательных подсистем, направленных на обеспечение эффективного использования энергетических и материально-сырьевых ресурсов в различных отраслях и секторах экономики / Normative and legal, scientific and engineering, social and economic, information and educational subsystems developing under their inherent laws and aimed at providing efficient usage of energy and physical raw materials resources in various industries and sectors of the economics	Ф.М. Черномуров, В.П. Ануфриев, А.Г. Мокроносов, Н.Г. Михайлов, Л.М. Теслюк [64, 65] / F.M. Chernomurov, V.P. Anufriev, A.G. Mokronosov, N.G. Mikhailov, L.M. Teslyuk [64, 65]
Факторов (организационных, технических, технологических, социальных, экологических, экономических) / Factors (organizational, engineering, technological, social, ecological and economic)	О.М. Пасынкова [67] / O.M. Pasyunkova [67]
Б. Ресурсосбережение как процесс / B Resource-saving as a process of	
Формирования пропорций между применяемыми ресурсами, уровнем их использования в сфере производства и потребления, приводящих к росту степени удовлетворения существующих потребностей за счет увеличения количества извлекаемых полезных компонентов из применяемых ресурсов при условии безопасности страны, экологической системы, регионов, человека / Forming proportions between usable resources and level of their usage in the fields of production and consumption resulting in an increase of a degree of satisfying the existing demands by means of an increasing amount of useful components derived from the usable resources under condition of the safety of the state, ecological system, regions, and human	И.Л. Воротников [60] / I.L. Vorotnikov [60]
Рационализации использования ресурсов предприятия на основе внедрения результатов научно-технического прогресса, оптимизации хозяйственных связей, усиления режима экономии, применения прогрессивных методов управления, обеспечивающих повышение эффективности использования ресурсов / Rationalization of enterprise resource usage based on the introduction of scientific and technological advance results, optimization of economic ties, intensifying regime of economy, application of advanced management methods providing an increase in resource usage efficiency	Ж.Г. Шумак и О.В. Орешникова [68] / Zh.G. Shumak, O.V. Oreshnikova [68]
Обеспечения роста полезных результатов при относительной стабильности материальных затрат / Providing an increase of useful results with the relative stability of physical cost	А.Ф. Аксененко [69], Д.В. Чикишев [70] / A.F. Aksenenko [69], D.V. Chikishev [70]
Формирования ресурсного потенциала как основы экономического развития / Forming resource potential as a basis of economic development; Прироста чистой прибыли и обеспечение безубыточности производства как компонента ресурсосбережения / Gain in net profit and providing a production break-even as a resource-saving component; Снижения загрязнения окружающей среды и минимизации затрат на возмещение экологического ущерба / Reducing environmental pollution and minimizing cost for reparation of ecological damages	Е.А. Шоколенко [71] / E.A. Shokolenko [71]

Продолжение табл. 1

Сущность авторского подхода к рассматриваемому аспекту ресурсосбережения / The essence of the author's approach to considered resource-saving aspect	Авторы и ссылки / Authors and references
Снижения материалоемкости и энергоемкости продукции, устранения потерь / Reducing material and energy consumption in production, eliminating losses	А.А. Каленюк [72] / A.A. Kalenyuk [72]
Экономии, рационального использования ресурсов / Saving, rational usage of resources	А.С. Савенко [63], А.С. Попов [62] / A.S. Savenko [63], A.S. Popov [62]
Эффективности взаимодействия отдельных видов ресурсов в производственном процессе, их наилучшего сочетания / The efficiency of interaction between some resource types in the production process, their best combination	И.И. Гизяттов [54] / I.I. Gizyatov [54]
Сокращения финансовых расходов, затрат ресурсов на всех стадиях жизненного цикла продукции (в натуральном выражении) / Reducing financial and resource expenses at all the stages of the product life cycle (in natural terms)	Е.А. Шоколенко [71], С.А. Рошечкаев [61] / E.A. Shokolenko [71], S.A. Roshchektaev [61]
Сокращения потерь трудовых, финансовых и прочих ресурсов / Reducing losses of labour, financial and other resources; Оптимизации системы учета, контроля и рационального использования ресурсов / Optimization of accounting, control and rational usage of resources	Н.В. Махаева [73] / N.V. Makhaeva
Всемирной экономии затрат общественного труда, обеспечиваемой при оптимальном, сбалансированном развитии экономики / Global saving of social labour expenses provided with optimal well-balanced development of economics; Рационализации использования ресурсов при производстве продукции с точки зрения расхода ресурсов и конечных результатов производства и потребления / Rationalization of resource usage in the production of goods in terms of resource consumption and final results of the production and consumption	Т.А. Косович [74] / T.A. Kosovich [74]
В. Цель, результат внедрения ресурсосбережения / C Purpose and result of resource-saving introduction	
Снижение ресурсоемкости продукции / Reducing resource consumption in the production of goods	Г.А. Безносков [75] / G.A. Beznosov [75]
Потребление ресурсов в наименьшем объеме на единицу производимой продукции / Resource consumption in minimal amount per product unit	С.В. Курбатова [76] / S.V. Kurbatova [76]
Универсальный инструмент повышения эффективности хозяйственной деятельности, роста производства продукции при неизменном количестве использованного сырья, материалов / A universal tool of increasing economic activity efficiency and goods production from the invariable amount of used raw and materials	С.А. Лоскутов [80] / S.A. Loskutov [80]
Снижение ресурсопотребления в процессе производства и потребления продукции / Reducing resource consumption in the course of product manufacturing and consumption	А.В. Богатырев [77] / A.V. Bogatyrev [77]
Обеспечения необходимого уровня результативности экономической системы в настоящем и будущем / Providing a necessary level of economic effectiveness at present and in future	А.М. Мантулин [66] / A.M. Mantulin [66]
Обеспечения устойчивого экономического роста / Providing sustainable economic growth	Д. Энхтайван [78] / D. Enhtawine [78]
Получение максимального эффекта от использования ресурсов / Obtaining the maximal effect of resource usage	Т.А. Косович [74] / T.A. Kosovich [74]
Получение некоего необходимого полезного эффекта / Obtaining a certain necessary useful effect	И.Л. Воротников [60] / I.L. Vorotnikov [60]
Достижение прогрессивных результатов эффективности производственно-хозяйственной деятельности субъектов рыночной экономики / Achieving progressive results of the efficiency of production and economic activity of market economy enterprises	С.А. Рошечкаев [61] / S.A. Roshchektaev [61]
Получения дополнительного притока денежных средств / Obtaining additional cash ionflow of money	О.М. Пасынкова [67] / O.M. Pasyunkova [67]
Увеличение выхода конечной продукции / Increase of final product output	А.А. Каленюк [72] / A.A. Kalenyuk [72]
Безопасность страны, экосистемы, регионов, фирм, человека / Safety of country, ecosystem, regions, enterprises, humans	Т.А. Косович [74] / T.A. Kosovich [74]

Сущность авторского подхода к рассматриваемому аспекту ресурсосбережения / The essence of the author's approach to considered resource-saving aspect	Авторы и ссылки / Authors and references
Дополнительная величина валового, чистого доходов и прибыли / An additional value of gross income, net income, and profit	С.В. Урусова [79] / S.V. Urusova [79]
Г. Ресурсосбережение как фактор / D Resource-saving as a factor of	
Экономного и эффективного использования всех ресурсов производства, общее свойство которых состоит в потенциальной возможности участия в производстве (производственные ресурсы) и потреблении (потребительские ресурсы) / Economical and efficient usage of all the resources common property of which is concluded in the potential possibility of participation in production (production resources) and consumption (consumer resources)	П.В. Березовский, Л.И. Исаева [81] / P.V. Berezovsky, L.I. Isaeva [81]
Технологического процесса, обеспечивающего минимизацию затрат ресурсов / A technological process providing minimization of resource consumption	Т.А. Косович [74] / T.A. Kosovich [74]
Развития производственной сферы, повышения эффективности производства / Development of production, an increase of production efficiency	Р.И. Хансевичев [82] / R.I. Khansevyarov [82]
Комплексного использования ресурсов, максимального устранения потерь, более полного вовлечения в оборот вторичных ресурсов / Integrated usage of resources, maximal elimination of losses, more full involvement of secondary resources in turnover	Ж.Г. Шумаков, О.В. Орешникова [68] / Zh.G. Shumakov, O.V. Oreshnikova [68]
Наименьшего воздействия предприятия на окружающую среду / Minimal impact of enterprise on the environment	Н.В. Махаева [73] / N.V. Makhaeva [73]
Развития экономики страны в современных условиях / Developing country economics in modern conditions	Е.С. Мелехин [83] / Me- lekhin E.S. [83]
Обеспечения экологической безопасности / Providing ecological safety	Г.А. Безносков [75]; В.И. Посметьев, В.А. Зе- ликов [84]; С.А. Редутко [85] / G.A. Beznosov [75], V.I. Posmetiev, V.A. Zeli- kov [84], S.A. Rakutko [85]
Энергетической безопасности (энерго- и ресурсосбережение) / Providing energy safety (energy- and resource-saving)	П.А. Кулигин [86], К.А. Пузакова [87] / P.A. Kuligin [86], K.A. Puzakova [87]
Обеспечения экономической безопасности / Providing economic safety	Б.К. Плоткин, С.Г. Пле- щиц, Л.Н. Мармышева, П.П. Дергаль [88], И.П. Богомолова, Е.И. Кривенко, Е.С. Стряпчих [39] / Plotkin B.K., Pleschits S.G., Marmysheva L.N., Dergal P.P. [88], I.P. Bogomolova, E.I. Krivenko, E.S. Stryap- chih [39]
Обеспечения техносферной безопасности / Providing technical safety	Л.А. Филимонова, Н.К. Скворцова [89] / L.A. Filimonova, N.K. Skvortsova [89]
Безопасности жизнедеятельности / Providing a personal and social safety	А.И. Юров [90], Л.И. Тищенко [91], И.Л. Кравчук, А.В. Смолин [92] / A.I. Yurov [90], L.I. Tish- chenko [91], I.L. Kravchuk, A.V. Smolin [92]

Нормативные подходы к определению понятия «ресурсосбережение»

Ресурсосбережение в качестве экономической или иной категории должно быть соответствующим образом определено и регламентировано на законодательном уровне. Без закрепленных в федеральных законах и подзаконных актах терминологии и правового регулирования, без экономической заинтересованности бизнеса в решении вопросов ресурсосбережения, всевозможные научные разработки в этой сфере не получают успешного практического внедрения. Несмотря на попытки ученых в области экологического права, экономики, менеджмента, а также представительных органов власти выработать единую общепринятую, закрепленную на законодательном уровне терминологию с введением понятий: «ресурсосбережение», «вторичные ресурсы», «обращение вторичных ресурсов», «вторичное сырье», а также эффективную для бюджетов различных уровней, бизнеса, хозяйствующих субъектов управленческо-регулятивную, финансово-стимулирующую систему, до настоящего времени эти усилия не увенчались успехом. Существующие пробелы в российском законодательстве не позволяют заложить фундаментальную базу стратегического перспективного планирования экономики и рационального использования ресурсов, не говоря уже о каких-либо эффективных мерах по практической реализации этих важных для устойчивого развития страны и общества социально-экономических и экологических задач.

В федеральных законах и подзаконных актах чисто декларативно упоминаются рациональное использование ресурсов и внедрение ресурсосберегающих технологий как важные приоритетные задачи, при этом организационно-правовой, регулирующий и экономический механизмы их реализации в законодательстве не установлены.

Федеральный закон «О промышленной политике в Российской Федерации» (ст. 4) определил одной из приоритетных задач промышленной политики «стимулирование субъектов деятельности в сфере промышленности рационально и эффективно использовать ... материальные, природные ресурсы ... обеспечивать внедрение ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий».

Ст. 36 Федерального закона «Об охране окружающей среды» в составе требований в области охраны окружающей среды при проектировании зданий, строений, сооружений и иных объектов определена «необходимость применения ресурсосберегающих, малоотходных, безотходных и иных наилучших существующих технологий, способствующих охране и восстановлению природной среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов».

В Федеральном законе «Об отходах производства и потребления» (ст. 3) одним из основных принципов государственной политики в области обращения с отходами провозглашена «комплексная переработка материально-сырьевых ресурсов в целях уменьшения количества отходов».

В рамках утвержденной распоряжением Правительства РФ в 2002 г. Экологической доктрины, одними из основных направлений обеспечения устойчивого развития служат «внедрение ресурсосберегающих и безотходных технологий во всех сферах хозяйственной деятельности, развитие системы использования вторичных ресурсов, переработки отходов».

Одним из основополагающих принципов принятой Правительством РФ в 2018 г. «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» (далее — Стратегия) становится ресурсосбережение и максимальное вовлечение отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья и для получения энергии.

Документ стратегического планирования определен в РФ в качестве основы для формирования и реализации государственной промышленной политики в сфере ресурсосбережения и вовлечения вторичных материальных ресурсов в хозяйственный оборот на федеральном, региональном, муниципальном и отраслевом уровне; ставит целью — обеспечение поэтапного снижения количеств образующихся отходов на основе внедрения ресурсосберегающих, малоотходных и безотходных технологий, ориентированных на принципы концепции «Ноль отходов».

Однако до сих пор на правительственном уровне не утвержден План мероприятий по реализации этой актуальной и прогрессивной Стратегии.

Принятые межгосударственные и национальные стандарты в области ресурсосбережения не позволяют с учетом их правового статуса системно и комплексно организовывать, регулировать, экономически стимулировать ресурсосберегающую деятельность в масштабах российского государства. В рамках проведения тематического обзора при выявлении содержания и области применения понятия «ресурсосбережение» было изучено более 130 межгосударственных и национальных стандартов в рассматриваемой сфере, принятых в период 1995–2018 гг. В документах за указанный период термин «ресурсосбережение» устанавливался в 1995 и 2014 гг. в межгосударственных стандартах и в 2003 г. в национальном стандарте.

В ГОСТ 30166-95 «Ресурсосбережение. Основные положения» впервые в истории современной

России даны определения понятию «ресурсосбережение» и ряду других в этой предметной области. Указанная терминология присутствует в аналогичном стандарте 2014 г.

В национальном стандарте ГОСТ Р 52104-2003 «Ресурсосбережение. Термины и определения», а затем и в ГОСТ Р 52106-2003 «Ресурсосбережение. Общие положения» ресурсосбережение определено как «организационная, экономическая, техническая, научная, практическая и информационная деятельность, методы, процессы, комплекс организационно-технических мер и мероприятий, сопровождающих все стадии жизненного цикла объектов и направленных на рациональное использование и экономное расходование ресурсов».

Согласно положениям ГОСТ Р 52106-2003 основными задачами ресурсосбережения являются: максимальное сохранение; рациональное использование и экономия материальных ресурсов; сохранение равновесия между развитием производств и потреблением вторичных материальных ресурсов с сохранением устойчивости окружающей среды; сбережение топлива и энергии; обеспечение экономически эффективного и безопасного использования вторичных ресурсов; совершенствование систем управления качеством производства продукции, ее реализации и потребления.

В соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 30166-2014 «Ресурсосбережение. Основные положения», ресурсосбережение выступает в качестве «фундаментальной составляющей хозяйственного развития, определяющей его устойчивость в комплексе со стратегиями обеспечения качества объектов, сохранения и защиты окружающей среды, поддержания условий социальной ответственности и безопасности труда».

Понятия «вторичные ресурсы», «вторичные материальные ресурсы», «вторичные энергетические ресурсы» раскрываются в ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения».

В рамках указанных документов по стандартизации к основным технико-экономическим показателям ресурсосбережения отнесены:

- ресурсоемкость как показатель материалоемкости и энергоемкости при изготовлении, ремонте и утилизации продукции;
- ресурсопотребление (ресурсоиспользование) как расходование ресурсов различных видов на стадиях жизненного цикла объекта, продукции;
- ресурсосодержание, включающее показатели состава и содержания сосредоточенных в продукции, услугах и работах ресурсов, определяющие свойства продукции, связанные с наличием в ее составе материальных и/или энергетических ресурсов;

- ресурсоэкономичность, характеризующая расходование материальных и энергетических ресурсов в процессе эксплуатации, ремонта и утилизации продукции.

Принятые стандарты категории «ресурсосбережение» закрепляют общие положения и терминологию в сфере вторичных ресурсов, сбережения и экономии ресурсов, жизненного цикла продукции, обращения с отходами, наилучших доступных технологий в различных отраслях промышленности, регламентируют деятельность по обращению (сбору, хранению, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению, транспортированию, включая трансграничное перемещение) с отдельными группами отходов: упаковкой, шинами, бумагами и картона, ломом металлов, ртутьсодержащими, электротехнического и электронного оборудования. В стандартах подчеркивается взаимовлияние между рациональным использованием ресурсов, ресурсосбережением и качеством продукции.

Резюмируя научные и нормативные подходы к характеристике, существу, содержанию понятия «ресурсосбережение», на взгляд автора статьи, следует рассматривать ресурсосбережение как системную социально-экономическую, природно-ресурсную, экологическую, организационно-техническую, научно-технологическую и управленческую категорию, составляющую хозяйственного механизма развития государства в целом, отрасли экономики, предпринимательской сферы, хозяйствующего субъекта, определяющую их устойчивое развитие в комплексе со стратегиями, перспективными мерами обеспечения качества функционирования производственных объектов, выпускаемой продукции, оказываемых услуг и производимых работ, экономической и экологической безопасности, условий социальной ответственности, техники безопасности и охраны труда.

Проблема ресурсосбережения во взаимосвязи с различными аспектами хозяйственной деятельности

Для выработки в настоящей работе возможных концептуальных подходов к формированию комплексной системы ресурсосбережения как эффективного механизма организационно-управленческой, технико-экономической деятельности на всех уровнях материального производства и потребления, рассмотрим проблему ресурсосбережения во взаимосвязи с различными аспектами хозяйственной деятельности.

В этой связи большое значение для настоящего исследования имеет концепция взаимоувязки, взаимозависимости процессов *ресурсосбережения*, сохранения, рационального, экономного использо-

вания ресурсов и качества жизни людей, подразумевая при этом, что содержание понятия «*качество жизни*» имеет одно из первостепенных значений для устойчивого развития государства и общества в целом.

С научной точки зрения базовой основой теории «всеобщего управления качеством» (Total Quality Management — TQM) служит концепция «непрерывного совершенствования» Э. Деминга, обозначающая конкретные изменения в обществе [94].

Одним из наиболее авторитетных считается мнение, выраженное в коллективной работе, выполненной под руководством нобелевских лауреатов из США Дж. Стиглица и А. Сена при участии известного французского экономиста Ж.-П. Фитоусси. Итоговые результаты данного исследования опубликованы на платформе Еврокомиссии в 2009 г. [95]. В научном докладе было определено три концептуальных подхода к оценке качества жизни: анализ функциональных возможностей (экология и условия окружающей среды, здравоохранение, личная безопасность, образование, политические свободы, управление, общественные связи, правовая и экономическая защищенность); субъективная оценка благополучия (удовлетворенность семейной жизнью, бытовыми, трудовыми условиями, финансовым состоянием); измерение (оценка) справедливого распределения.

По результатам исследования его авторами сделаны следующие выводы:

- основную информацию о качестве жизни для конкретного человека представляют показатели субъективного благополучия;
- качество жизни зависит от объективных условий жизни людей, что формирует задачи государства по улучшению качества окружающей среды и обеспечению экологической безопасности, совершенствованию сфер здравоохранения, образования, социально-бытовых условий, политической активности, налаживания социальных связей;
- показатели качества жизни во всех аспектах целесообразно оценивать комплексно, системно с учетом значимости (весомости).

По мнению ряда авторов, качество жизни в значительной степени определяется состоянием среды жизнедеятельности, свойства которой в контексте задач «зеленой» экономики зависят от выбора экологических, социально-экономических стратегий и тактики применения финансово-экономических, организационных механизмов их реализации, в частности, экономии материальных, энергетических, природных ресурсов на основе энерго-, ресурсосбережения как инструмента данной политики [30, 33, 35, 96].

Проблема ресурсосбережения, рационального использования ресурсов, выпуска продукции с использованием ценного вторичного сырья тесно взаимосвязана не только с вопросами качества жизни людей, но и обеспечения качества продукции на всех этапах ее жизненного цикла. Качество жизни человека во многом определяет качество (включающее в себя безопасность, эргономичность, экономичность, высокие гигиенические и технико-эксплуатационные свойства, надежность (безотказность, сохраняемость, долговечность, ремонтпригодность), эстетичность, возможность утилизации) потребляемой продукции: пищевой, строительной, текстильной, мебельной, электронного и электротехнического оборудования и устройств, транспортной и других групп. Вместе с тем, по данным проводимых социологических опросов, периодически публикуемых в средствах массовой информации и социальных сетях, качество реализуемых товаров, продукции, услуг вызывает у большинства населения страны недовольство и тревогу за безопасность для жизни и здоровья.

Категории «качество» и «ресурсосбережение» тесно взаимоувязаны в системе организации и управления производством. Экономия ресурсов на всех уровнях управления обращением продукции, материалов, сырья является одной из важнейших задач стратегического менеджмента. Во-первых, как показывают результаты настоящего тематического обзора, вопросы экологической и экономической безопасности государства, отрасли, предприятия неразрывно связаны между собой. Во-вторых, ресурсоемкость является такой же важнейшей характеристикой и показателем продукции, как и качество. Означенная позиция отражена не только в многочисленных трудах отечественных и зарубежных авторов, но и закреплена в документах по стандартизации. Более того, по результатам анализа данной проблемы, следует выделить основные факторы, влияющие и на эффективность использования материальных ресурсов, а также ресурсоемкость, и на качество выпускаемой продукции:

- качество исходного сырья и его стоимость;
- уровень технологичности оборудования, степень его износа;
- нормативные технико-эксплуатационные показатели продукции;
- планы по снижению материальных затрат в себестоимости продукции;
- оптимальное сочетание видов сырья и производственной программы;
- уровень возможностей хозяйствующих субъектов в вопросах приобретения материально-сырьевых ресурсов, производства и реализации продукции, выхода на устойчивые рынки ее сбыта;

- уровень цен на выпускаемую продукцию;
- позиция государства в части стимулирования ресурсосбережения, выпуска качественной продукции с использованием вторичных ресурсов;
- финансовое состояние, возможности модернизации, технического перевооружения, внедрения инноваций, наилучших доступных технологий;
- степень прогрессивности, оптимальности организационно-технической схемы производства;
- уровень квалификации и профессиональной подготовки рабочих, менеджеров, ИТР, производственной дисциплины;
- степень материальной и иной заинтересованности работников в повышении качества продукции и сбережении производственных ресурсов.

Рассматриваемая проблема уходит корнями в прошлое столетие. Основой появления системы управления качеством, пришедшей в государствах ЕС, США, Японии и ряде других стран на смену действующей форме контроля исключительно на этапе выхода продукции, стал предложенный учеными кибернетический подход. Во второй половине прошлого столетия исследователь А. Фейгенбаум предложил методологию рассмотрения оценки качества на каждом этапе (цикле) в процессе создания продукции, включая оценку качества исходного сырья, полуфабриката, заготовки. Инновационный подход позволил выявлять причины, условия возникновения потерь, брака, разрабатывать необходимые организационно-технические мероприятия по достижению требований качества в соответствии с принятыми регламентами, нормативами, правилами, стандартами. В этом процессе параллельно изучались вопросы минимизации остатков неиспользуемого сырья, потерь, брака, оптимизация раскроя и моделирования исходного материала и ряд других тем, касающихся энерго- и ресурсосбережения на производстве. Побудительным мотивом во многом стал именно экономический: максимизация прибыли, рентабельности продукции и продаж при минимизации материальных и энергетических затрат в условиях рыночной экономики и жесткой конкуренции [97].

Как отмечает Е.А. Скрыпник, на основе анализа научных работ Г.А. Соколовской, Т.С. Сигаревой, Г.А. Яновского, Ю.Д. Амирова, связь между ресурсосбережением и качеством проявляется следующим образом. Во-первых, повышение качества продукции служит одним из резервов оптимизации использования и экономии ресурсов в сфере ее потребления, благодаря улучшению потребительских свойств. Во-вторых, в процессе обращения продукции, выполнения работ, оказания услуг применяются различные группы ресурсов (материальные, энергетические и иные), которые необходимо опти-

мально использовать на каждом этапе жизненного цикла, применяя современные высокоэффективные методы их экономии [98, 99].

Схожая позиция высказывалась исследователями А.В. Бреславцевым, Л.Т. Хижняк, Н.И. Ивановым в работе «Ресурсосбережение промышленных предприятий» (Донецк, 1999 г.). По мнению вышеуказанных авторов, неудовлетворительное управление качеством на уровне хозяйствующего субъекта приводит к увеличению текущих расходов и неэффективному использованию материальных и энергетических ресурсов.

Н.К. Топузовым, А.А. Алабугиным в работе [100] предложена новая парадигма, концепция управления ресурсосбережением, отличающаяся возможностями повышения качества продукции при снижении затрат. Авторская концепция реализуется на основе принципов инновационного ресурсозамещения, предполагает при этом, что механизм управления ресурсосбережением обеспечивает согласование интересов и синхронизацию процессов в цикле инновационного развития по этапам «генерация — адаптация — коммерциализация — модернизация».

В трудах вышеназванных исследователей процесс управления ресурсосбережением на предприятии рассматривается как определенная система функций управления. Среди них выделяют: анализ, разработку стратегии, прогнозирование и планирование, организацию, оценку и контроль. И.А. Кинаш акцентирует внимание на том, что экономное использование материальных ресурсов заключается в технологически возможной и научно обоснованной минимизации уровня расхода сырья и материалов как составной части производственного потребления, при условии изготовления продукции высокого качества [101].

В целях обеспечения высокого уровня потребительских свойств продукции и экономного использования ресурсов на всех стадиях ее жизненного цикла реализуются специальные функции управления, связанные с ресурсосбережением, к которым, по мнению авторов работ [98, 101–104], отнесены: стратегическое и тактическое планирование мер по повышению качества продукции; прогнозирование на перспективу потребностей, спроса и предложения, требуемого в условиях рынка технического уровня и качества продукции; сертификация продукции по техническим, гигиеническим, экологическим требованиям; стандартизация и нормирование требований качества; внедрение наилучших доступных технологий; качественное и современное метрологическое обеспечение; эффективная, оптимальная организация технологической подготовки, разработки и постановки новой продукции на про-

изводство; обеспечение стабильности заданного уровня качества продукции на всех этапах ее жизненного цикла: подготовке сырья, разработке, выпуске, складировании, транспортировании, сбыте и потреблении (эксплуатации), утилизации; стимулирование повышения ресурсосбережения и качества продукции.

В работах [22, 105] ресурсосбережение представляет собой процесс рационализации использования материально-технических, природных, трудовых, финансовых и иных ресурсов на базе интенсификации производства с целью получения продукции с наилучшими качественными показателями, минимумом инвестиций и текущих расходов.

Проведенный анализ отечественных публикаций не позволил выявить общепринятого научно обоснованного, практически реализуемого системного подхода к вопросам организации *управления качеством продукции* как одной из основных составляющих управления ресурсосбережением, важного элемента хозяйственной деятельности и экономической системы в целом.

Исследование процессов *ресурсосбережения на промышленных предприятиях* различных отраслей и секторов экономики занимает центральное место в работах значительной группы авторов. Интерес к научным исследованиям в данной предметной области обусловлен тем, что в процессе хозяйственной деятельности ресурсы определяют практически все ее аспекты и стороны: экономическую, организационно-техническую, производственно-технологическую, экологическую, управленческую, характер и перспективы этой деятельности, ее направления и состав. Базовыми экономическими предпосылками для осуществления ресурсосберегающей политики на промышленных предприятиях являются: непрерывное возрастание потребления сырья и материалов и, как результат, уменьшение природно-сырьевых запасов и повышение цен на них.

Формирование научно обоснованного механизма ресурсосбережения, а также системы факторов и критериев оценки основных технико-экономических показателей работы, влияющих на эффективную реализацию мер по ресурсосбережению на производстве и наоборот — влияния ресурсосбережения на технико-экономические и экологические показатели развития предприятия являются, по мнению исследователей, одной из актуальных задач в процессе поиска путей повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов, оптимизации производственно-экономической деятельности хозяйствующих субъектов.

Методы ресурсосбережения на отраслевых предприятиях стали предметом изучения Р.Х. Ис-

магилова, выделившего в своей работе [106] следующие методы ресурсосбережения:

- организационно-распорядительные, позволяющие воздействовать на управляемый объект и повышать эффективность функционирования всей системы за счет лучшей организации управления; при этом улучшение организации управления может быть достигнуто путем установления правил, обязательных для выполнения и определяющих содержание и порядок организационной деятельности;
- инженерно-технологические, напрямую воздействующие на управляемый объект — использование результатов научно-технического прогресса в целях ресурсосбережения (применение прогрессивных технологий, методов научной организации труда, механизация и автоматизация производства);
- экономические — как совокупность приемов и способов воздействия на исполнителей путем оценки затрат и результатов по средствам материального стимулирования, введения системы штрафов, санкций;
- социально-психологические, включающие проведение обучения персонала в области ресурсосбережения, формирование экологической культуры.

В работах О.Е. Астафьевой, Е.Г. Москалевой, М.Е. Кузнецова, Е.О. Дергуновой подчеркивается, что на сегодняшний день реализация программ по повышению эффективности энерго- и ресурсосбережения, охраны окружающей среды и рационального, экономного использования природных ресурсов на уровне хозяйствующих субъектов требует не только дополнительных инвестиций, но и принятия грамотных управленческих, организационно-технических решений, основанных на глубоких научных исследованиях, внедрении инновационных форм производственной деятельности и наилучших доступных технологий [107–109].

По мнению указанных авторов, меры по обеспечению ресурсосбережения на производстве включают в себя комплекс взаимосвязанных технических, технологических, организационно-экономических мероприятий. Отмечается, что технические и технологические направления ресурсосбережения практически отработаны значительно лучше, чем экономические, и выражаются в конкретных действиях и результирующих показателях.

Согласно данной исследователями оценке, технические факторы ресурсосбережения представляют собой использование технологий обеспечивающих минимальные потери материалов; модернизацию технической базы транспортирования и хранения ресурсов; улучшение качества применяемых ресурсов и создание материалов с заранее заданными улучшенными свойствами; применение оборудования, реализующего технологии оптималь-

ного расхода материала; совершенствование технологических режимов переработки сырья; создание научно-экспериментальной базы компьютерного моделирования расхода ресурсов.

Организационные факторы ресурсосбережения, с точки зрения исследователей, базируются на совершенствовании организации производства и труда с целью экономии материальных и энергетических ресурсов; разработке и внедрении организационно-технических мероприятий по экономии ресурсов; оптимизации организации учета их движения; сокращении циклов от получения до конечного использования ресурсов; повышении качества работы технологического оборудования, установок.

И, наконец, к социально-экономическим факторам ресурсосбережения ими отнесены: широкое использование мер экономического стимулирования, а также различных видов ответственности за экономию ресурсов; управление ресурсами на производстве с применением научных подходов, включая методы функционально-стоимостного анализа, экономической статистики, экономико-математического моделирования; усиление контроля за качеством, безопасностью сырья и материалов; повышение уровня техники безопасности и охраны труда за счет внедрения экологически безопасных технологий, замены опасных для здоровья работающих материалов и сырья нетоксичными изделиями из вторичного сырья; реализация социально-психологических мер (социальных опросов, тренингов), профессионального обучения по энерго- и ресурсосбережению [108, 109].

В работе «Ресурсосбережение как направление модернизации экономики» [44] В.А. Богатырев, А.В. Богатырев, Ю.П. Ефимычев выделили следующие виды эффектов, возникающих в результате реализации ресурсосберегающих мероприятий в ходе производственно-экономической деятельности хозяйствующего субъекта:

- экологический: снижение платежей за загрязнение окружающей среды, в первую очередь, за размещение отходов; штрафных санкций; платы за вывоз, утилизацию твердых коммунальных отходов;
- технологический: оптимизация расходов на оборудование; изменение объема выпуска продукции; снижение себестоимости единицы продукции, повышение уровня качества продукции;
- производственный: снижение материалоемкости продукции, трудозатрат, длительности производственного цикла, объемов незавершенного производства, увеличение режимного фонда работы оборудования и др.

Наиболее часто в работах указанных авторов анализируются методы оценки и планирования экономического эффекта от реализации мероприятий

в области ресурсосбережения с учетом внедрения организационно-технических мероприятий и прогрессивных технологий.

Важным экономическим инструментом изыскания производственных резервов рационального использования и экономии материальных, энергетических ресурсов служит экономический анализ, задачами которого, по мнению ряда ученых и специалистов, могут быть определены [110–112]:

- всесторонняя оценка потребности хозяйствующих субъектов в материальных и энергетических ресурсах;
- исследование оптимальности планирования и реализации процессов материально-технического снабжения, системный анализ их качественного своевременного выполнения, его влияния на объемы выпуска продукции, ее качество, себестоимость и иные технико-экономические показатели;
- оценка уровня эффективности использования ресурсов;
- определение системы факторов, способствующих изменению, отклонению фактических показателей использования ресурсов от нормативных, запланированных или в сравнении с предыдущими периодами (год, месяц);
- количественная оценка влияния факторов обращения материальных ресурсов на установленные отклонения показателей;
- выявление и оценка внутрихозяйственных, внутрипроизводственных резервов экономии материальных и энергетических ресурсов с разработкой и планированием конкретных мер, мероприятий по их реализации.

Нижегородский ученый А.В. Тихомиров в работе «Ресурсосберегающие технологии на основе применения полимеров в судостроении и судоремонте» подчеркивает, что эффективность ресурсосберегающих технологий может оцениваться по следующим технико-экономическим показателям: материалам, трудоемкости, топливным ресурсам, электрической энергии, финансам. При этом оценка уровня безотходности может основываться на показателях, характеризующих степень замкнутости материально-сырьевых потоков на «входе» и «выходе» производства по отношению к окружающей среде. Оценка этих величин в натурально-вещественном исчислении позволяет дать более достоверную, не подверженную влиянию цен и структурных сдвигов, оценку уровня безотходности производства.

В работе А.А. Абросимова, П.С. Шалабаева [113] всесторонне исследованы организационно-экономические аспекты ресурсосбережения в разрезе промышленных предприятий, в частности, влияние бережливого ресурсосберегающего производства на их устойчивое развитие. Авторами

обосновано, что между концепциями развития предприятий: ресурсосбережения и устойчивого развития есть существенная разница. Дана оценка причин, по которым использование ресурсосберегающих технологий не всегда ведет к устойчивому развитию предприятий. Определены ограничения, существующие на российских предприятиях, не способствующие эффективному внедрению бережливого производства.

Методологические аспекты управления ресурсосбережением с учетом экономических факторов исследовались Е.А. Захаровым. Автор на основе анализа ресурсосберегающей политики за рубежом выявил принципы построения механизма ресурсосбережения, состоящего из элементов экономического, правового, организационного, научно-технического характера, а также разработал экономико-математическую модель программного управления ресурсосбережением по конечному продукту с учетом штрафных санкций, платежей за негативное воздействие на окружающую среду, в частности, размещение отходов [115].

Р.Я. Ахмадиевым и Г.Ф. Мингалеевым разработана теория экономического обоснования ресурсосбережения как на уровне хозяйствующих субъектов, так и в народном хозяйстве в целом на основе системы показателей эффективности использования ресурсов: ресурсоемкости, экономического эффекта от снижения платы за природопользование и вследствие налогового увеличения поступлений, чистой прибыли участников ресурсосберегающего процесса [115].

Основным преимуществом предложенной методологии служит плавный переход от макроэкономических теорий ресурсосбережения к микроуровню (предприятие) с теоретически возможной актуализацией системы критериев, условий, показателей. Предложенная методика позволяет планировать и обосновывать инвестиции в ресурсосберегающие проекты, внедрение сберегающих ресурсов технологий. С другой стороны, представленный теоретический подход ориентирован на обобщенные целевые показатели, без детальной оценки эффективности использования отдельных материальных, энергетических, природных ресурсов, их обращения на всех этапах жизненного цикла, что может затруднить внедрение такого методического подхода в условиях современной экономической рыночной системы.

Ю.П. Лебединский и Ю.В. Скланкин в труде [116] сделали попытку экономически обосновать необходимость перевода производственных процессов на безотходный цикл и комплексное глубокое использование материально-сырьевых ресурсов. Исследователи выделяли условия безотходного перерабатывающего производства: высокий уровень

концентрации производства, передовые достижения науки и техники, перспективное устойчивое развитие промышленности.

По мнению Л.Н. Гановичевой, «...для проведения разумной ресурсосберегающей политики необходимо располагать информацией как ресурсного, так и затратного характера, что обуславливает целесообразность базирования общей концепции ресурсосбережения на «смешанном» ресурсно-затратном подходе...» [117].

Стратегические резервы ресурсосбережения, выделенные в работах А.Г. Айрапетовой, Н.А. Назарбаева [118, 119], представляют собой резервы экономии материальных ресурсов, реализация которых возможна только на основе принятия управленческих решений на государственном уровне и сопровождается крупным народнохозяйственным эффектом. Включение стратегических резервов ресурсосбережения в государственную доктрину на перспективу в определенных случаях может быть сопряжено с крупными преобразованиями или даже с изменением стратегии экономического развития страны по ряду ключевых вопросов. Стратегия ресурсосбережения, как отмечается в статьях, представляет собой комплекс принципов, факторов, методов, мероприятий, обеспечивающих поэтапное снижение расхода совокупных ресурсов на единицу валового национального продукта (в рамках страны), либо на единицу полезного эффекта конкретного товара при условии обеспечения безопасности страны, бизнеса, граждан.

По мнению ряда исследователей, экологическая составляющая эффективности реализации мероприятий в области ресурсосбережения предполагает учет основных принципов: минимизации источников загрязняющих веществ, образования и размещения отходов; комплексности использования материальных и энергетических ресурсов; замкнутости материальных потоков, т.е. поэтапного использования продукции технологических процессов; цикличности в виде многоразовости использования сырья; максимального потребления вторичного сырья, побочных продуктов и потенциала энергетических ресурсов; сохранения такого состояния окружающей среды, при котором антропогенное воздействие не вызывает ее отрицательных изменений [116, 120–123].

Большая группа ученых подчеркивает особую важность инноваций в развитии системы ресурсосбережения, выделяя их как один из главных факторов, обеспечивающих эффективный процесс сбережения ресурсов. Подчеркивается, что активная инновационная деятельность необходима предприятиям отраслей и секторов экономики для обеспечения конкурентоспособности и устойчивого разви-

тия в кратко-, средне- и долгосрочной перспективе. Обращается внимание, что различные виды инноваций неоднозначно влияют на ресурсосберегающую деятельность хозяйствующего субъекта. Ряд исследователей считают, что максимальный эффект достигается при планировании, инвестировании и внедрении технологических и производственных инноваций, направленных на создание и освоение новых видов качественной продукции, снижение ее ресурсоемкости, внедрение наилучших доступных технологий, модернизацию оборудования, производства, расширение производственных мощностей, диверсификацию производства, совершенствование его организации, вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, в наименьшей степени оказывают влияние маркетинговые, социальные и учебно-просветительские инновации [57, 68, 73, 74, 77, 82, 86, 100, 117, 124–127].

Проблемы ресурсосбережения на предприятиях железнодорожного транспорта, в транспортном, промышленном и гражданском строительстве, других отраслях экономики рассматривались и анализировались автором настоящей статьи с 1992 г. в научных работах по вопросам охраны природной среды, экологической безопасности, рационального использования природных ресурсов, обращения с отходами и вторичными ресурсами.

В статьях, опубликованных в журнале «Железнодорожный транспорт» в 1992–1994 гг., а также в монографии «Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте» (издания 1994 и 1996 гг.) [128] исследовались экономические аспекты внедрения оборотных систем водоснабжения и бессточных систем водопользования на объектах железнодорожного транспорта и транспортного строительства. В качестве экономически эффективного комплекса ресурсосберегающих (водосберегающих) организационно-технических мероприятий были обоснованы: технологии многократного использования производственных сточных вод после обработки и очистки в различных технологических процессах работы железнодорожных предприятий, применение безводных технологий, систем обработки и очистки сточных вод, утилизации отходов водоочистки, оптимизации технологических процессов, связанных с экономией воды как ценного природного ресурса, уменьшения объемов водопотребления и водоотведения, использования поверхностных стоков в качестве технической воды, рационализации системы водопользования и снижения потерь воды.

В этих работах еще в середине 90-х гг. XX в. поднимались и рассматривались вопросы экономного использования материальных ресурсов, которые чрезвычайно актуальны и в наше время. Авто-

ром акцентировано внимание на том, что проблема ресурсосбережения должна комплексно решаться на всех стадиях обращения продукции и материального производства: проектирования предприятий и производств, непосредственно в технологических процессах и в ходе потребления продукции.

Подчеркивается, что на стадии проектирования ресурсосбережение обеспечивается планированием в проектной документации прогрессивных ресурсосберегающих и безотходных технологий, мер по снижению материало- и энергоемкости, применением типовых конструкций и изделий, рационального выбора материалов и конструктивных элементов и др.

На стадии производства обеспечение рационального использования ресурсов может достигаться внедрением ресурсосберегающих технологий, снижением материалоемкости продукции, рациональной организацией производства, снижением потерь материалов, брака, использованием отходов производства и другими организационно-техническими мероприятиями.

На стадии потребления и реализации продукции ресурсосбережение реализуется оптимизацией транспортных потоков и поставок продукции, рациональным использованием, совершенствованием организации хранения и учета материалов, уменьшением уровня убыли, порчи и потерь, контролем за сохранностью и качеством, соблюдением норм и оптимизацией расхода сырья в процессе потребления, другими эффективными способами и мерами [128].

В авторской работе в области экономических и экологических аспектов обращения строительных материалов [129] акцентируется внимание на важном этапе жизненного цикла строительных материалов — сборе и повторном использовании остатков строительных материалов в качестве сырья для изготовления новых материалов и изделий при сносе зданий, строений, сооружений, снижении трудно устранимых потерь в процессе строительного производства. Эти процессы рассматриваются как один из путей повышения ресурсосбережения, ресурсоемкости строительства.

В коллективной монографии по вопросам экологической безопасности в строительстве [130] отмечается, что обеспечение экологической безопасности в процессе строительства и ремонта зданий, строений, сооружений реализуется на всех этапах инвестиционного процесса, в том числе посредством ресурсосбережения и использования в ремонтно-строительном производстве малоотходных и безотходных технологических процессов, ресурсосберегающих наилучших доступных технологий. Обращается внимание, что на первый план на предпроектной стадии и в процессе проектирования

строительства выходят задачи планирования энерго- и ресурсосберегающих, ресурсоемких технологий. Исследователи указывают, что при разработке оценки воздействия на окружающую среду целесообразно проводить, во-первых, оценку и обоснование возможности осуществления экологически безопасных способов ведения строительства, внедрения ресурсосберегающих технологий, применения экологически чистых и безопасных строительных материалов, с анализом издержек строительного производства по вариантам намечаемой деятельности; во-вторых, оценку рационального объема природных ресурсов, вовлекаемых в хозяйственный оборот с учетом неистощительности природных ресурсов.

Начиная с 2015 г. вопросы ресурсосбережения рассматривались автором статьи в контексте научных публикаций в ходе осуществления научного руководства и выполнения научно-исследовательских работ в Научно-исследовательском центре по проблемам управления ресурсосбережением и отходами (НИЦПУРО, ранее — Всесоюзный институт вторичных ресурсов (ВИВР), позднее переименован в НИИ «Центр экологической промышленной политики»), в процессе создания проекта Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г.

Особенности технико-экономического обоснования ресурсосберегающей модели системы обращения с отходами выделены автором в работе [131], в ней подчеркивается, что комплексная переработка сырья служит важнейшей не только экологической, но и экономической задачей, основой создания безотходных и малоотходных промышленных производств, а отходы рассматриваются как неиспользованная или недоиспользованная часть сырья, которая может быть вовлечена в процесс выпуска новой продукции. Вопросы применения ресурсосберегающих технологий и возобновляемых источников энергии в строительстве рассмотрены совместно с У.Д. Ниязгуловым, А.С. Шевченко в научной статье [132] на основе авторского проекта «Экодом». Проблемы повышения эффективности использования вторичных ресурсов поднимаются автором в работах [133, 134].

В ходе тематического обзора выявлены и другие, в большей мере теоретические, концепции ресурсосбережения и бережливого производства. Исследователем К.О. Сафроновой в труде «Концепция бережливого производства в контексте ноосферного мышления» (2010 г.) проведен анализ ноосферного мышления и генезиса становления бережливого подхода. Предложена гипотеза формирования бережливого производства, основанного на ноосферном мышлении. Автор делает вывод, что концепция

ноосферного мышления находит свое отражение в концепции становления и развития бережливого производства. По ее мнению, все дальнейшее развитие должно быть направлено на эволюционное развитие методов создания и работы по принципу «бережливости». На взгляд автора настоящей статьи, ценность таких исследований состоит в том, что общетеоретические подходы дают возможность нового осмысления рассматриваемой в работе категории в социально-философском плане.

По результатам сопоставительного анализа отечественной литературы в области проблем ресурсосбережения в отраслевом разрезе и на предприятиях можно сделать вывод о том, что практически во всех публикациях сущность ресурсосберегающей деятельности заключается в комплексном использовании ресурсов, максимальном устранении всех видов потерь, возможно более полном вовлечении в хозяйственный оборот вторичных материальных и энергетических ресурсов.

Исследование понятийного аппарата, проблем и направлений развития ресурсосбережения нашло свое отражение в многочисленных трудах зарубежных ученых и специалистов. Вопросы ресурсосбережения рассматривались в работах известных исследователей Д. Медоуза, К. Боулдинга, Р. Солоу, Т. Титенберга, Г. Тейлора, У. Росту, Е. Одум, Дж. Форрестера, П. Пильцера, Г. Дейли и др., подходившим с различных точек зрения к процессам рационального использования, сбережения, экономии ресурсов и их роли в реализации стратегии устойчивого развития [134–140].

Обобщая сложившиеся за рубежом подходы к трактованию понятия «ресурсосбережение», можно отметить, что его смысловой базой служит термин «ресурсы» (от франц. *ressource*), означающий вспомогательное средство, запас, источник чего-либо. С одной стороны, термин ассоциируется с природными ресурсами, которые могут быть использованы в социально-экономической деятельности людей, а с другой — как материальные средства природного характера, участвующие, после соответствующей обработки, в процессе производства и выпуска продукции. Вторая сторона понятия определяет ресурсы как предмет, средство, без которого производство невозможно вообще, т.е. подразумевает все факторы, обеспечивающие процесс производства: материальные (в том числе — на основе природных), энергетические, финансовые, технические, трудовые, информационные, как различные составляющие категории «ресурсы».

Различные варианты оценки понятия «ресурсы» привели, в свою очередь, к появлению двух методологических подходов к толкованию термина «ресурсосбережение». Один из них, соответствующий

щий первому представленному определению термина «ресурсы» [135, 139], основан на концепции формирования понятия «ресурсосбережение» как основополагающего для сохранения человечества принципа бережного, рачительного, неистощительного отношения к природным ресурсам и предполагает деятельность по их охране и рациональному использованию. Другой подход к формулированию понятия, основанный на более широкой интерпретации термина «ресурсы», предполагает, с одной стороны, вовлечение в состав предмета ресурсосбережения перечисленных выше видов ресурсов (включая и природные), обеспечивающих жизнедеятельность человека; с другой стороны, рассмотрение определения «сбережение» не как «сохранение» (консервация), а как «экономия» (рациональное, оптимальное, бережное расходование, либо выгода, полученная при бережливом расходовании (по Ожегову)), что переводит данное понятие в экономическую категорию.

В трудах зарубежных ученых по проблемам ресурсосбережения и экономики замкнутого цикла просматривается тенденция к рассмотрению традиционной хозяйственной деятельности на основе действующих стимулов повышения эффективности функционирования ресурсосберегающей экономики: налоговые инструменты, субсидии, внедрение прогрессивных ресурсосберегающих технологий и мероприятий, лицензирование и сертификация, нормы и параметры выработки продукции, конкурентные преимущества и другие рыночные регуляторы [14, 27, 47, 48, 50].

В значительном количестве трудов зарубежных ученых исследуется процесс экономии ресурсов как фактор ресурсосберегающей деятельности в целях обеспечения устойчивого экономического роста предприятия, отрасли, корпорации при условии соблюдения экологических требований. В рамках обозначенного научного подхода предлагается комплексно использовать экономические инструменты контроля за загрязнением природной среды и стимулы по формированию энерго- и ресурсосбережения на хозяйствующем субъекте: контроль, регулирование, учет, анализ, координация со стороны государства, а также рыночные инструменты [15, 16, 26, 28, 49, 51, 141–154].

Вопросы формирования, совершенствования «зеленой» экономики, «зеленых» технологий в качестве актуального направления эколого-экономической деятельности, важнейшего фактора повышения эффективности экономики, устойчивого развития общества занимают одно из центральных мест в трудах зарубежных авторов [15, 51, 52, 155–164].

По результатам сопоставительного анализа зарубежных теорий и методологий ресурсосбереже-

ния можно сделать вывод, что основные научные подходы, методы и принципы формирования ресурсосбережения сформированы преимущественно на основе рыночных механизмов, базирующихся на прибыли хозяйствующего субъекта при внедрении инноваций и построении своей производственно-экономической деятельности на основе ресурсосберегающего уклада.

Ряд российских авторов, давая оценку организационно-управленческим аспектам ресурсосбережения в трудах иностранных исследователей, отмечают, что ресурсосбережение, как объект управления рассматривается в экономическом, социальном, техническом и экологическом аспектах. Зарубежные концепции управления ресурсосбережением, с учетом специфики экономического роста на основе сбережения ресурсов, определяют основные типы управления: традиционный, устойчивый, инновационно-инвестиционный, акцентируя внимание на использовании эффективных организационно-управленческих решений, динамики компетенций персонала предприятий в достижении целей ресурсосбережения [11, 36, 91, 114, 165, 166].

Первостепенное значение, по мнению исследователей, имеет законодательное и нормативное обеспечение ресурсосберегающей деятельности на всех уровнях управления, регулирования, хозяйствования, во всех отраслях и секторах экономики.

Как показали результаты анализа отечественной и иностранной литературы в ходе тематического обзора, существенным отличием политики ресурсосбережения в России и за рубежом является заинтересованность ведущих экономически развитых стран в мероприятиях и технологиях сбережения ресурсов. В индустриально развитых зарубежных странах энерго- и ресурсосбережение представляет собой одно из основных направлений, рычагов устойчивого экономического развития и политической стабильности, обеспечения сырьевой и экологической безопасности. В качестве государственной политики в данной сфере решаются задачи: сокращения зависимости от импорта в ресурсопотреблении; обеспечения ресурсосбережения и рационального природопользования, сохранения стратегических запасов природных ресурсов на основе применения мало- и безотходных технологий, вовлечения вторичных ресурсов в производство; консолидации научно-технических и финансовых ресурсов на создание и внедрение инновационных ресурсосберегающих технологий, оборудования.

В США, Японии, Индии, Китае, ЕС государство, как законодатель и регулятор, формирует основы ресурсосберегающей политики, создает и законодательно закрепляет регулирующие и стимулирующие инструменты энерго-, водо-, ресур-

сбережения, сохранения природных ресурсов, внедрения «зеленых» технологий, развития процесса «зеленого» строительства, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, активно способствуя перспективному развитию «зеленой» экономики, ее базовой составляющей — экономики замкнутого цикла, основополагающим принципом которой является концепция «ноль отходов».

Так, например, законодательством Китая и Индии регламентировано обязательное использование до 25 % золошлаковых отходов (ЗШО) при производстве кирпича, блоков и плитки на предприятиях, расположенных в радиусе до 100 км от ТЭС, а также применение золы в качестве основного материала при сооружении насыпей во всех дорожных работах с введением штрафов за неиспользование ЗШО для этих целей. Финансовые поступления от штрафных санкций направляются на развитие производств, использующих ЗШО для выпуска продукции или применения в различных строительных, дорожных и иных работах. В Европе в качестве экономических рычагов стимулирования таких производств юридически закреплена плата перерабатывающим предприятиям за вывоз ЗШО с золошлакоотвалов ТЭС. В результате ряд энергокомпаний в перечисленных странах, эксплуатирующих угольные ТЭС, организовав на своей территории непрерывную переработку ЗШО в товарную продукцию, функционируют без золоотвалов [167, 168].

В ряде стран действуют обязательные нормативы содержания вторичных ресурсов в строительной, мебельной, бумажной продукции, услугах ЖКХ, ремонтно-строительных работах; некоторые виды продукции подлежат выпуску исключительно из вторичного сырья: пластмассовые и резиновые изделия, туалетная бумага, рекламная литература и пр.; техническое водоснабжение, полив территории разрешается только с использованием оборотной технической воды или собранных поверхностных стоков. Активно реализуется политика закупки товаров и услуг, полученных с использованием вторичных ресурсов у предприятий частного сектора по льготным ценам. В некоторых государствах юридически закреплено положение об ограничении доступа хозяйствующим субъектам, не реализующим ресурсосберегающую политику, не выполняющим программы или иные меры в области сбережения ресурсов — к государственным субсидиям, грантам, льготным кредитам. Несмотря на то, что государство законодательно не имеет права принудительно внедрять меры по энерго- и ресурсосбережению на частных предприятиях, оно способно регулировать этот процесс путем ужесточения или отказа от заключения договоров о государственных поставках с предприятиями частного сектора, не от-

вечающих принятым стандартам в сфере сбережения ресурсов.

Финансово-экономические рычаги и стимулы ресурсосбережения за рубежом предусматривают бюджетное финансирование (дотации, субсидии, гранты), кредитование, налогообложение, тарифную политику.

Бюджетное финансирование предусматривает целевое выделение денежных средств на проведение ресурсосберегающих мероприятий и внедрение технологий для реализации прибыльности ведения бизнеса. В период освоения ресурсосберегающих инноваций в случае необеспечения необходимого уровня прибыльности мероприятий, соответствующие дотации из бюджета покрывают убытки хозяйствующего субъекта. Бюджетные дотации выделяются на мероприятия, которые в наибольшей степени отражают достижения научно-технического прогресса, на внедрение ресурсоемких энерго- и ресурсосберегающих технологий, разработку новой техники с качественно новыми технико-эксплуатационными показателями и характеристиками, выпуск безопасной, ресурсоемкой конкурентоспособной продукции. Выплаты дотаций, субсидий осуществляются с учетом успешного освоения производства, модернизации технологического цикла. Государственные гранты для софинансирования инвестиций в новое ресурсосберегающее оборудование, как правило, предоставляются крупным промышленным потребителям, которые могут обеспечить значительную экономию материальных и энергетических ресурсов.

Кредитование предусматривает льготные кредиты хозяйствующим субъектам, осваивающим ресурсоемкие мероприятия с высокой степенью финансового риска, но создающие условия для экономии материальных ресурсов. Условия и величина предоставляемой льготной процентной ставки за кредит определяются с учетом сроков окупаемости, уровня рентабельности проводимых мероприятий, дефицитности высвобождаемого ресурса.

Льготы по отдельным видам налогов устанавливаются предприятиям, частным предпринимателям, гражданам за экономное расходование отдельных видов ресурсов, хозяйствующим субъектам — за выпуск продукции с улучшенными ресурсосберегающими показателями производственной деятельности, вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот. Эффективно применяются также отсрочка по налогам, снижение сроков амортизации энергосберегающего оборудования, налоговые льготы для хозяйствующих субъектов, выпускающих облигации или иные долговые обязательства с целью получения капитала для инвестиций в приобретение нового ресурсосберегающего или модер-

низацию морально и физически устаревшего малоэффективного оборудования.

Во многих странах активно реализуется тарифная политика. В ряде штатов США введена многоступенчатая система тарифов для различных категорий потребителей. Устанавливается минимальный тариф для населения, если ежемесячное потребление ресурсов в составе коммунальных услуг не превышает определенного лимита. В случае, если ресурсы расходуются сверх установленного уровня, тариф существенно повышается. Понижающие тарифы введены для промышленных предприятий, реализующих меры по обеспечению энерго-, водо-, ресурсосбережения.

Как отмечается в трудах [169–175], наиболее актуальной в мировом масштабе проблема энерго- и ресурсосбережения представляется в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительном комплексе. По мнению ряда авторов, в России данная проблема изучена менее глубоко и разносторонне в сравнении со странами ЕС, США, Японии, а главное — ресурсосберегающие меры крайне медленно внедряются в означенных отраслях экономики.

Анализ зарубежного опыта управления энерго- и ресурсосбережением в строительном комплексе и ЖКХ является базовой платформой для получения теоретических знаний и выработки высокоэффективных практических решений в сфере изучения, планирования, внедрения инновационных мероприятий и технологий по сбережению природных, материальных и энергетических ресурсов в нашей стране [165, 169, 176–180].

В упомянутых выше странах получили распространение новые формы бизнеса в ресурсосберегающей сфере. Активно внедряются программы, направленные на создание условий изменения спроса в целях повышения заинтересованности потребителей в эффективных ресурсосберегающих технологиях. Важнейшим элементом данной политики является согласование интересов потребителей и ресурсоснабжающих компаний. Так, в США ресурсоснабжающая компания обязана по закону удовлетворять любой спрос на ресурс в зоне своей ответственности. В случае возможного повышения спроса на ресурс, компания рассматривает два варианта: увеличения мощности или сохранения существующего ресурсопотребления путем проведения энерго- и ресурсосберегающих мероприятий; в большинстве случаев второй вариант экономически выгоднее. Арендаторы и жильцы домов также получают поощрение от государства в виде понижения кредитных ставок за меры по водо-, энергосбережению. В этих странах созданы финансово-экономические условия и стимулы, при которых затраты

на энерго- и ресурсосбережение в жилищно-коммунальной сфере окупаются в течение нескольких лет и становятся привлекательными для частных инвесторов. Все программы сферы ЖКХ базируются на основных принципах:

1. Государство разработало законодательную базу для энергосбережения, определило национальные стандарты в этой области.

2. Государство предоставило финансовую помощь арендаторам жилья и собственникам, объединениям собственников и управляющим компаниям.

3. Государство обеспечило необходимой информацией потенциальных инвесторов и заказчиков работ.

4. Государство установило простую и понятную всем процедуру льготного налогообложения в этой сфере [165, 169, 176–180].

Обобщенный по результатам тематического обзора некоторый опыт ряда ведущих мировых стран в области нормативно-правового обеспечения, регулирования, стимулирования ресурсосбережения представлен в табл. 2.

Наша страна не стоит в стороне от мирового процесса сертификации «зеленого строительства». На сегодняшний день активно начато внедрение международных стандартов — BREEAM, LEED, DGNB. Приняты Федеральные законы «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и «Технический регламент безопасности зданий и сооружений». Разработаны и используются национальные системы сертификации: ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости» как национальный стандарт «зеленого строительства» и СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания». Приоритетом, заложенным в ГОСТ Р 54964-2012, является формирование экологических требований к объектам недвижимости на основе соблюдения принципа устойчивого развития общества. Первым национальным «зеленым» стандартом строительства стала Система добровольной сертификации объектов недвижимости «Зеленые стандарты», ставящая своей целью стимулирование проектировщиков, строителей, эксплуатирующие фирмы внедрять ресурсосберегающие, энергоэффективные технологии, использовать экологически чистые материалы, снижающие негативное воздействие объектов недвижимости на здоровье людей и окружающую среду. Система предназначена для проведения сертификации земельных участков, зданий, сооружений, помещений, объектов незавершенного строительства. Более десятка построенных в нашей

Табл. 2. Обобщенный по результатам тематического обзора опыт ряда зарубежных стран в области ресурсосбережения
Table 2. Experience of several countries in resource-saving generalized by theme review results

Страна / Country	Меры в области ресурсосбережения / Resource-saving measures
Нормативно-правовое обеспечение и регулирование / Normative and legal provision and regulation	
США / USA	Закон о национальной политике в области экономии энергии, регулирующий выделение государственных субсидий для внедрения энергосберегающих технологий и оборудования, установление льгот по налогообложению прибыли, получаемой от производства энергосберегающего оборудования и использования менее дорогостоящих энергоресурсов / Act on national policy in the field of energy conservation, regulating state subsidies for introducing energy-saving technologies and equipment, establishing tax exemptions for producing energy-saving equipment, and using low-cost energy resources. Стандарт LEED «Руководство (лидерство) в энергоэкономичном и природоохранном проектировании» (Совет США по «зеленым» зданиям), 34 штата законодательно приняли отдельные правила для системы LEED проектов: налоговые послабления, вычеты, льготные кредиты или прямые дотации, гранты на развитие стандартов и программ по энергоэффективности; в некоторых штатах и городах «зеленым» зданиям предоставляются налоговые льготы и гранты в целях стимулирования развития «зеленого» строительства / LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) standard of US Council on Green Buildings. 34 states accepted rules for LEED project system: tax exemptions, preferential credits or direct subsidies, grants for developing standards, and programmes on energy efficiency. Some states and cities grant tax exemptions or subsidies for the green buildings to promote green construction development
Япония / Japan	Законом о рациональном использовании энергии предусмотрено, что для производителей продукции при планировании мероприятий по рациональному использованию энергии обязательны следующие направления деятельности: рациональное сжигание топлива; использование тепла как при нагревании, так и при охлаждении; предотвращение тепловых потерь в процессах, связанных с излучением, преобразованием тепловой энергии в механическую; предотвращение потерь электроэнергии от сопротивления; рациональное преобразование электроэнергии в тепловую и другие виды энергии / Act of rational energy usage foresees that when planning measures on rational energy usage, producers are to respect the following guidelines: rational fuel burning, heat usage both during heating and during cooling, preventing heat loss in processes connected with radiation and conversion of thermal energy to mechanical energy, preventing energy loss due to resistance, rational transformation of electric energy to thermal and other types of energy. Государственная стратегия развития технологий солнечной энергетики / State strategy of development of solar energy technologies. Национальная система стандартов «зеленого» строительства «Зеленый стандарт» CASBEE / National green construction standard system: Green standard CASBEE
Германия / Germany	В результате установления нормативно-регулирующих мер обеспечивается около 15 % потребности промышленности за счет переработки отходов и использования их в качестве вторичного сырья / As a result of the establishment of normative and regulation measures, about 15 % of industrial demand is provided by waste recycling and waste usage as secondary raw. Возможность получения владельцами домов или арендаторами беспроцентных займов для модернизации, технического переоснащения зданий и покупки оборудования в целях экономии энергии / House owners or lessees have the possibility to get interest-free loans for upgrading or technical re-equipment of the buildings and purchasing equipment for energy saving. Реализуются программы «взаимной экономии», согласно которым компании идут на бесплатное переоборудование объектов социально-бытового назначения, покрывая свои расходы за счет получения от них в течение ряда лет до 75 % сэкономленных благодаря снижению энергоемкости / Following mutual-economy programmes, companies re-equip social and living facilities free of charge, compensating their expenses by obtaining up to 75 % of funds saved owing to the energy consumption reduction for several years. Утвержденные государством в своих национальных стратегиях и планах действий целевые задачи по повышению эффективности/производительности материальных ресурсов, основываясь на основных индикаторах ЕС (отношение валового внутреннего продукта к потреблению материалов внутри страны) / Targets of increasing physical resource efficiency/productivity based on leading EU indicators (ratio of gross domestic product to physical domestic consumption) approved by the state in its national strategy and road maps Государственная программа повышения эффективности использования ресурсов, предполагающая обеспечить более устойчивое извлечение и использование природных ресурсов (2012), включает руководящие принципы: / State programme of increasing resource usage efficiency supposes to provide more sustainable extraction and usage of natural resources (2012) and includes the following guidelines:

Страна / Country	Меры в области ресурсосбережения / Resource-saving measures
	объединение экологических задач с экономическими возможностями, поддержка инноваций и реализация социальной ответственности / consolidation of ecological problems with ecological possibilities, support of innovations and realization of social responsibility; определение глобальной ответственности в качестве ключевого аспекта политики ресурсопотребления / definition of social responsibility as the key aspect of resource-saving policy; обеспечение устойчивого использования ресурсов в долгосрочной перспективе; / providing sustainable resource usage in long-term prospect; постепенное сокращение зависимости экономики от потребления первичных ресурсов и развитие экономики замкнутого цикла / gradual reduction of economics dependence on primary resource consumption and development of closed-cycle economics. Программа ProgRess охватывает всю цепочку создания стоимости: устойчивое обеспечение сырьем, повышение эффективности использования ресурсов в производственных процессах, повышение ресурсоэффективности потребления и в управлении циклическими процессами. В общей сложности 20 стратегических подходов определяются вместе с мерами по их реализации. Целевая национальная стратегия в области материальных ресурсов/сырьевых материалов. Региональные и местные стратегии в области повышения эффективности использования ресурсов / ProgRess programme covers the entire chain of value creation: sustainable raw supply, increasing efficiency of resource usage in production processes, increasing resource-efficiency of consumption, and cyclic process management. A total of 20 strategic approaches are defined together with measures on their realization. Target national strategy in the field of physical resources/raw materials. Regional and local strategies in the field of increasing efficiency of resource usage. Национальная система стандартов «зеленого» строительства «Зеленый стандарт» DGNB, принятый Советом по экологическому строительству / National green construction standard system: Green standard DGNB accepted by Council on Ecological Construction
Франция / France	Закон об энергетическом переходном процессе (2015) в качестве национальной стратегии и плана действий в области энергосбережения и энергоэффективности / Act on energy transfer process (2015) as a national strategy and road map in the field of energy-saving and energy efficiency. Региональные агентства энергии при 22 региональных советах, выполняющие координирующую, регулирующую роль в области энергосбережения / Regional energy agencies at 22 regional councils for coordination and regulation functions in the field of energy-saving. Утвержденные государством в своих национальных стратегиях и планах действий целевые задачи по повышению эффективности/производительности материальных ресурсов, основываясь на основных индикаторах ЕС (отношение ВВП к потреблению материалов внутри страны) / Targets of increasing physical resource efficiency/productivity based on main EU indicators approved by the state in its national strategy and road maps. Национальная система стандартов «Зеленый стандарт» HQE / National standard system: Green Standard HQE
Китай / China	Национальная система стандартов «Зеленый стандарт» GBAS / National standard system: Green Standard GBAS. Нормативные акты в сфере использования природных и вторичных ресурсов / Normative acts in the field of using natural and secondary resources
Финансово-экономические стимулы / Financial and economic incentives	
США / USA	Введение налогов, временно повышающих на 10–15 % уровень цен на важнейшие виды энергоносителей, сырье, пользующихся нерационально высоким спросом / Introduction of taxes, temporarily increasing by 10 to 15 % the level of prices for most important types of energy carriers and raw enjoying irrationally high demand. Дифференциация налогообложения в зависимости от источника энергии и трудоемкости ее добычи (в США величина налога в зависимости от этих факторов составляла 70, 60 и 30 % прибыли) / Differentiation of taxation depending on energy source and labour-intensity of its production (in the USA tax value depending on these factors was 70, 60 and 30 % of the profit). Снижение налогов субъектам, проводящим активную ресурсосберегающую политику и несущим дополнительные расходы на замену энергосберегающего оборудования, установку устройств аккумуляции солнечной и ветровой энергии / Tax exemption for enterprises conducting active resource-saving policy and bearing additional expenses for replacement of energy-saving equipment, installation of solar and wind energy accumulators. Скидки на стоимость электроэнергии вне времени пиковых нагрузок / Discounts for electrical energy cost except for the peak-load time.

Окончание табл. 2

Страна / Country	Меры в области ресурсосбережения / Resource-saving measures
Япония / Japan	Механизм государственного регулирования цен при установлении тарифов на электроэнергию для стимулирования сокращения ее расходов / Mechanism of state regulation of prices when establishing rates for electrical energy for promoting the reduction of its consumption. Льготное кредитование на экологические и энергетические мероприятия по процентной ставке, ниже средней действующего уровня / Preferential crediting for ecological and energy-saving measures with an interest rate below the average level. Налоговая скидка по энергосберегающему оборудованию (снижение налогооблагаемой базы на 25–30 % его стоимости) или ускоренная амортизация / Tax exemption for energy-saving equipment (reduction of the tax base by 25 to 30 % of the equipment cost) or accelerated amortisation. Принятая целевая направленность инвестиций: не менее 30 % выделяется на расширение мощностей, 20 % — на средства автоматизации и 8–10 % — на меры, технологии, направленные на экономию сырья, материалов и энергии / Accepted target direction of investments: at least 30% is assigned for the capacity extension, 20 % for automation aids and 8 to 10% for measures aimed at saving of raw, materials and energy.
Германия / Germany	Государственное финансирование, регулирование сферы научных исследований конструкторских и технологических разработок в области энергосбережения / The state financing and regulating R&D in the field of resource-saving. Покрытие государством части ссудного займа на энергосберегающие программы / The state pays a part of the loan for energy-saving programmes. Государственное субсидирование «зеленой» экономики способствовало тому, что в настоящее время порядка 20–30 % общего количества потребляемого электричества обеспечивается за счет использования возобновляемых источников энергии (ветро-солнечных станций и установок) / The state backing of “green” economics promoted the fact that nowadays about 20 to 30 % of the total amount of consumed electricity is provided by means of using renewable energy (wind/solar stations). Кредит с пониженной ставкой, беспроцентный кредит или облегченный заем на осуществление ресурсосберегающих мероприятий / Low-interest credit, interest-free credit or easy loan for resource-saving measures.
Франция / France	Дополнительное государственное инвестирование в виде субсидий в крупные инвестиционные проекты с применением ресурсосберегающих технологий / Additional state investment (subsidies) for large-scale investment projects using energy-saving technologies. Прямое государственное финансирование не менее 25–30 % стоимости энерго- и ресурсосберегающих мероприятий хозяйствующих субъектов / Direct state financing for at least 25 to 30 % of the cost of energy- and resource-saving measures of enterprises. Кредитование ресурсосберегающих мер по льготной процентной ставке / Crediting resource-saving measures with preferential rate
Китай / China	Ресурсосбережение реализуется через создание специального инвестиционного фонда (формируемого за счет 20 % поступлений амортизационных отчислений) для финансирования программ ресурсосбережения / Resource-saving is implemented through the creation of a special investment fund (formed by 20 % of depreciation charges) for financing resource-saving programmes

стране промышленных, жилых, транспортных зданий получили положительную оценку на соответствие «зеленым стандартам».

Исходя из анализа литературных источников можно отметить, что внедрение водо-, энерго- и ресурсосберегающих технологий предопределяет уменьшение издержек на строительство и экономические выгоды: снижение энергопотребления минимизирует затраты на тепло- и электроэнергию; снижение водопотребления приводит к значительному снижению издержек на водоснабжение и канализацию; сокращение затрат на обслуживание здания достигается за счет эффективных строительных материалов с использованием вторичных ресурсов более высокого качества; повышение стоимости при продаже и стоимости аренды за счет спроса на экологически безопасные здания и помещения. Увеличенная текущая чистая выручка и стоимость активов собственности могут привести к более низким финансовым и страховым расходам. Внедрение «зеленых» технологий в перспективе станет самым эффективным средством для снижения себестоимости строительства, так как дополнительная себестоимость «зеленых» зданий может быть амортизирована в ходе эксплуатации и обычно компенсируется в краткосрочный период за счет снижения эксплуатационных затрат. Реализация принципов «зеленого» строительства способствует расширению рынка жилья, скорейшей окупаемости арендных площадей и получению значительной арендной платы за счет большей активности арендаторов на заключение договоров аренды, а результаты сертификации могут быть использованы как основа для рекламной кампании строительной продукции [130, 170, 173, 181, 182].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе, с учетом установленных ограничительных возможностей рассмотрения чрезвычайно широкой и многосторонней предметной области в рамках научной статьи, на основе всестороннего тематического обзора, анализа исторических этапов развития, автором сделана попытка систематизировать представления отечественного и зарубежного научного, экспертного сообщества по актуальным проблемам ресурсосбережения, перспективам и направлениям реализации этой важной составляющей социально-экономического, технико-технологического и экологического развития общества, науки, бизнеса и государства в целом.

Резюмируя проанализированные в данной статье результаты научных исследований, нормативно-правовые документы, следует отметить, что как зарубежные, так и отечественные ученые и специ-

алисты справедливо выделяют ресурсосбережение в качестве основного фактора повышения эффективности производства, действенного инструмента экономического развития, выдвигая при этом на первый план рыночные экономические рычаги управления, регулирования и финансового стимулирования ресурсосберегающих организационно-технических мер и мероприятий, но при условии обязательного государственного участия в этих процессах.

По результатам тематического обзора и проведенного системного анализа материалов представляется возможным сделать следующие выводы о современном состоянии рассматриваемого вопроса в нашей стране:

- законодательная база ресурсосбережения и обращения вторичных ресурсов не сформирована, принятые стандарты категории «Ресурсосбережение» не позволяют обеспечить эффективное регулирования ресурсосберегающей деятельности, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот;
- система государственного, производственного управления, регулирования ресурсосберегающей деятельности находится в стадии формирования, поиска путей эффективного внедрения, реализации и перспективного развития;
- с учетом экстенсивного затратного природно-ресурсно-сырьевого характера функционирования национальной экономики, рыночные механизмы не оказывают позитивного регулирующего воздействия на процессы ресурсосбережения, вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот;
- ресурсосбережение не характеризуется комплексностью и системностью в качестве эффективного, рационального, оптимального процесса производства и потребления, востребованного вида экономической деятельности.

Тем не менее следует отметить, что у России, с учетом многовекового многогранного положительного исторического опыта ресурсосберегающей деятельности, принятого курса нашей страны на обеспечение экологической безопасности и устойчивое социально-экономическое развитие, есть реальный исторический шанс стать одной из ведущих мировых держав, в которых ресурсосбережение может выступить главным двигателем роста экономики, совершенствования промышленно-технологической политики, внедрения научно-технических инноваций, повышения качества жизни.

По мнению автора статьи, этому могут способствовать конкретные поэтапные меры в правовой, экономической, научно-технической сферах:

- формирование законодательной базы (Федеральные законы «Об обращении вторичных ресурсов», «О ресурсосбережении», в которых будут

установлены все составляющие механизма: понятийный аппарат, требования на всех этапах обращения, категории вторресурсов, мало- и безотходных технологий, управление, контроль, регулирование, нормирование, учет, отчетность, экономическое обоснование и стимулирование, меры ответственности за нарушение требований, международное сотрудничество) с внесением изменений и дополнений в действующее законодательство: ФЗ «Об отходах производства и потребления», «О промышленной политике в РФ», «Об охране окружающей среды, Градостроительный кодекс, КоАП, УК и др.;

- разработка пакета подзаконных актов, определяющих конкретные меры по реализации механизма ресурсосбережения и обращения вторичных ресурсов: правила обращения вторичных ресурсов, организации ресурсосберегающей деятельности в процессе производства и потребления продукции, регламентация государственной поддержки, экономического стимулирования ресурсосберегающих мероприятий, основы экономического механизма сбережения ресурсов и их обращения, нормирование вторичных ресурсов, производственных потерь, критерии малоотходных, безотходных технологий;

- разработка отраслевых и региональных стратегий ресурсосбережения, определяющих перспективные направления в области: энерго-, водо-, ресурсосбережения, вовлечения вторресурсов в хозяйственный оборот; развития инфраструктуры переработки вторичных ресурсов и рынков их сбыта; направлений экономии ресурсов; систем эффективности внедрения ресурсосберегающих мер; оптимизации достигаемых показателей качества продукции, ресурсоемкости, ресурсоэкономичности, энергоэффективности, на предприятиях промышленности, строительства, в других отраслях экономики, на федеральном, региональном, мест-

ном уровне с установлением целевых показателей и планов по поэтапной реализации мероприятий;

- закрепление в системе научных исследований обособленной предметной области — «ресурсосбережение и обращение вторичных ресурсов»;

- формирование полного пакета документов по стандартизации, регламентирующего все аспекты ресурсосберегающей деятельности.

Предлагаемый автором перечень необходимых стандартов категории «ресурсосбережение» для формирования единой системы управления, регулирования, учета, классификации, нормирования обращения вторичных ресурсов и сферы ресурсосбережения с обеспечением эффективного комплексного регулирующего воздействия в промышленности, ЖКХ, строительстве, других отраслях и секторах экономики представлен в табл. 3.

Эффективное нормативно-правовое регулирование ресурсосбережения напрямую способствует реализации стратегических задач по обеспечению экологической безопасности в строительном комплексе: созданию эффективной системы ресурсосберегающей деятельности на всех этапах инвестиционного процесса, инновационному развитию строительной индустрии при минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Автор работы выражает надежду, что углубление понимания сущности категории «ресурсосбережение» на основе обобщения существующих научно-методических подходов, экспертных оценок и рекомендаций по внедрению механизма ресурсосбережения, результатов международного опыта управления, регулирования и стимулирования ресурсосберегающей деятельности, обозначит пути перспективных научных направлений исследований в этой чрезвычайно актуальной и значимой области знаний.

Табл. 3. Перечень необходимых национальных стандартов в области ресурсосбережения

Table 3. List of necessary national standards in the field of resource-saving

Наименование стандарта / Standard denomination	Цель введения / Purpose of introduction	Состав документа / Document composition
Ресурсосбережение. Этапы обращения с вторичными ресурсами. Термины и определения / Resource-saving. Stages of secondary resource handling. Terms and definitions	Определить понятийный аппарат в области обращения с вторичными ресурсами / Define conceptual system in the field of secondary resource handling	Область применения. Нормативные ссылки. Общие понятия. Вторичные ресурсы. Обращение вторичных ресурсов. Сбор (раздельный) сбор. Накопление. Хранение. Обработка. Транспортирование. Использование. Направления использования. Владение. Распоряжение. Пользование. Отчуждение. Купля-продажа. Рынок вторресурсов / Field of application. Normative references. General concept. Secondary resources. Handling of secondary resources. Collection (separate collection). Accumulation. Storage. Treatment. Transportation. Usage. Usage guidelines. Ownership. Disposal. Right of use. Alienation. Purchase and sale. Secondary resource market.

Наименование стандарта / Standard denomination	Цель введения / Purpose of introduction	Состав документа / Document composition
Ресурсосбережение. Документирование, учет и регулирование деятельности по обращению с вторичными ресурсами / Resource-saving. Documenting, accounting and regulation of activity on secondary resource handling	Определить порядок документирования, учета и регулирования деятельности по обращению с вторичными ресурсами на всех стадиях их обращения / Define the order of documenting, accounting and regulation of activity on secondary resource handling at all the stages	Документирование деятельности по обращению с вторичными ресурсами на различных стадиях обращения. Федеральная, региональная и муниципальная системы регулирования, документирования, учета обращения с вторичными ресурсами. Документирование и учет обращения с вторичными ресурсами в процессе деятельности хозяйствующих субъектов. Формы учета обращения с вторичными ресурсами. Типовая региональная стратегия (концепция) обращения с вторичными ресурсами / Documenting of activity on secondary resource handling at all the stages. Federal, regional, and municipal regulation, documentation, accounting system. Documenting and accounting of secondary resource handling in the course of enterprise activity. Forms of accounting of secondary resource handling. Typical regional strategy (concept) of secondary resource handling
Ресурсосбережение. Раздельный сбор вторичных ресурсов (на промышленных площадках хозяйствующих субъектов). Общие положения / Resource-saving. Separate collection of secondary resources (on industrial enterprise sites). General provisions	Регламентация требований по раздельному сбору вторичных ресурсов на промышленных предприятиях / Regulate requirements for separate collection of secondary resources at industrial enterprises	Требования и порядок раздельного сбора вторичных ресурсов на этапах производственно-технологического цикла выпуска продукции. Использование побочных продуктов и обработанных вторичных ресурсов. Временное накопление вторичных ресурсов. Учет раздельно собранных вторичных ресурсов / Requirements for and order of separate collecting secondary resources at stages of production and technological cycle of product output. Usage of by-products and treated secondary resources. Temporary accumulation of secondary resources. Accounting of separately collected secondary resources.
Ресурсосбережение. Требования по организации раздельного сбора вторичных ресурсов в жилом секторе. Общие положения / Resource-saving. Requirements for the organization of a separate collection of secondary resources in the residential sector	Регламентация раздельного сбора вторичных ресурсов в жилом секторе / Regulate separate collection of secondary resources in the residential sector	Требования по организации раздельного сбора вторичных ресурсов в жилом секторе. Стационарный и передвижной способы раздельного сбора вторсырья. Информирование населения о порядке, правилах, организованных местах раздельного сбора. Экономическое стимулирование населения к раздельному сбору, обработке и сдаче вторичных ресурсов в виде вторсырья / Requirements for the organization of a separate collection of secondary resources in the residential sector. Stationary and portable methods of separate collection of secondary resources. Informing people on order, rules, assigned sites of separate collection. Economic incentives of people to separate collection, treatment, and delivery of secondary resources as secondary raw.
Ресурсосбережение. Критерии и условия отнесения технологических процессов к ресурсосберегающим (мало-, безотходным) / Resource-saving. Criteria and conditions of rating technological processes as resource-saving (low-waste, waste-free) ones	Регламентация требований по обеспечению ресурсосбережения на производстве / Regulate requirements for providing resource-saving in production.	Модель ресурсосберегающего производства. Классификация ресурсосберегающих технологий. Классификация и состав организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение ресурсосбережения. Критерии и условия отнесения технологических процессов к ресурсосберегающим (мало- и безотходным) / Model of resource-saving production. Classification of resource-saving technologies. Classification and composition of organizational and technical measures aimed at providing resource-saving. Criteria and conditions of rating technological processes as resource-saving (low-waste, waste-free) ones.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков В.М., Цховребов Э.С. Правовые основы охраны окружающей среды. М. : МОФ МосУ МВД России, 2004. 100 с.
2. Цховребов Э.С., Лебин А.Н., Белоусов В.Г. Новейшая история развития природоохранной деятельности в России // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2012. Т. 18. № 2. С. 192–196.
3. Величко Е.Г., Цховребов Э.С. Экологическая безопасность строительных материалов: основные исторические этапы // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 26–35. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.26-35
4. Цховребов Э.С., Г.И. Цуцкарева, С.В. Дуденков, А.К. Голубин, Л.Я. Шубов, Д.О. Скобелев и др. От ВИВР к ЦЭПП: краткая история Всесоюзного института вторичных ресурсов и утилизации отходов в России и мире. М. : Издательство «Водолей-Саут», 2017. 190 с.
5. Одесс В.И. Вторичные ресурсы: хозяйственный механизм использования. М. : Экономика, 1988. 157 с.
6. Сорг Т.Дж., Бендиксен Т.У., Квортли Э. и др. Утилизация твердых отходов /под ред. Д. Вилсона; сокр. пер. с англ. Э.Г. Тетерина и А.С. Скотникова. М. : Стройиздат, 1985. 336 с.
7. Яременко Ю.В. Экономический рост. Структурная политика // Проблемы прогнозирования. 2001. № 1. С. 6–14.
8. Гановичева Л.Н. Ресурсосбережение и инновации как основа экономической модели развития регионов // Проблемы современной экономики. 2009. № 3 (31). С. 298–299.
9. Малинецкий Г.Г. Рециклинг. Взгляд из будущего // Рециклинг отходов. 2011. № 3 (33). С. 2–8.
10. De Haan J., Lundstrom S., Sturm J.-E. Market-Oriented Institutions and Policies and Economic Growth: A Critical Survey // Journal of Economic Surveys. 2006. Vol. 20. Issue 2. Pp. 157–191. DOI: 10.1111/j.0950-0804.2006.00278.x
11. Потапова И.Ю., Астафьева О.Е. Российское и зарубежное государственное регулирование и стимулирование ресурсосбережения // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 5 (30). С. 81. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/174EVN515.pdf>
12. Барский Л.А., Бебчук Б.Ц., Гофман К.Г., Гусев А.А. Методы эколого-экономического обоснования развития безотходных производств // Экономика и математические методы. 1987. Т. XXIII. Вып. 2.
13. Murray R. Zero waste // Greenpeace Environmental Trust. 2002. 211 p.
14. Dubois M. Economic benefits of the circular economy — Acritical review of the literature and opportunities for CGE modelling, Draft paper prepared for the OECD Working Party on Resource Productivity and Waste, ENV/EPOC. 2015. 123 p.
15. Vallero D.A., Brasier C. Sustainable Design: The Science of Sustainability and Green Engineering. John Wiley & Sons, Inc, 2008. 333 p. DOI: 10.1002/9780470259603
16. Berninger K., Heikkilä L., Kolev Z., Orjala M., Teräsväininen T. Waste management and recycling in Finland // Conference Presentation. 2010. 173 p.
17. Zaman A.U. A comprehensive review of the development of zero waste management: lessons learned and guidelines // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 91. Pp. 12–25. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.013
18. Аганбегян А.Г. Александрова Е.И., Костяшкин Н.А. Экономический механизм эффективного использования ресурсов потребления. М. : Наука, 1988. 541 с.
19. Андрианов В.М., Соколова Н.А., Усков М.Е. Комплексное использование сырья в промышленности. М. : Экономика, 1988. 301 с.
20. Дроздовский Э.Е. Методологические проблемы рационализации ресурсопользования. Иркутск : Изд-во Иркутского университета, 1986. 170 с.
21. Кролли О.А. Материально-техническое снабжение: ресурсосберегающая деятельность. М. : Экономика, 1988. 418 с.
22. Лейкина К.Б. Ликвидация потерь — резерв интенсификации производства. М. : Экономика, 1985. 213 с.
23. Пирогов Н.Л., Сушон С.П., Завалко А.Г. Вторичные ресурсы: Эффективность. Опыт. Перспективы. М. : Экономика, 1987. 312 с.
24. Поляк А.М. Материалоемкость продукции. Вопросы снижения. М. : Экономика, 1986. 139 с.
25. Виленский М.А. Эффективность ресурсосберегающих технологий // Вопросы экономики. 1986. № 10. С. 32–37.
26. Elgizawy S.M., El-Haggag S.M., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study // Procedia Engineering. 2016. Vol. 145. Pp. 1306–1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168
27. Hart J., Adams K., Giesekam J., Tingley D.D., Pomponi F. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment // Procedia CIRP. 2019. Vol. 80. Pp. 619–624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015
28. Telizhenko O.M. Concept of integrated waste management as recoverable resources in product cycle // Journal of Environmental Science and Engineering. 2012. Vol. 1. Issue 3. Pp. 312–323.
29. Носко П.А. Тенденции развития экономики замкнутого цикла в Европейском союзе // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2019. № 1. Т. 6.

10 с. URL: <https://resources.today/PDF/04ECOR119.pdf> DOI: 10.15862/04ECOR119

30. Бобылев С.Н., Захаров В.М. «Зеленая» экономика и модернизация. Эколого-экономические основы устойчивого развития // Бюллетень «На пути к устойчивому развитию России». 2012. № 60. 90 с.

31. Теличенко В.И. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4 (103). С. 364–372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372

32. Никитин Г.С., Осмаков В.С., Скобелев Д.О. «Зеленая» экономика. совершенствование институциональной инфраструктуры // Компетентность. 2017. № 3 (144). С. 29–33.

33. Никоноров С.М. К «зеленой» экономике через «зеленые» финансы, биоэкономику и устойчивое развитие // Русская политология. 2017. № 3 (4). С. 12–15.

34. Комарова О.П., Медведева Л.Н., Козенко К.Ю. Продвижение зеленых технологий как основа для стратегического развития городских и сельских поселений России // Фундаментальные исследования. 2015. № 11–5. С. 1009–1113.

35. Родионова И.А., Липина С.А. Зеленая экономика в России: модель и прогнозы развития // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–24. С. 5462–5466.

36. Чердакова М.П. Ресурсосбережение как государственная политика // Вестник Чувашского университета. 2013. № 4. С. 432–435.

37. Вишняков Я.Д., Волостнов Б.И., Киселева С.П., Поляков В.В. Совершенствование механизма стимулирования инновационного развития в области рационального природопользования и экологической безопасности // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 2. С. 3–9.

38. Голуб И.Н., Агабекян Р.Л. Государственное регулирование ресурсосбережения. Краснодар, 2008. 274 с.

39. Богомолова И.П., Кривенко Е.И., Стряпчих Е.С. Обеспечение экономической безопасности государства на основе управления ресурсосбережением // ФЭС: Финансы. Экономика. 2018. № 5. С. 16–23.

40. Цховребов Э.С. Экономические и правовые аспекты обращения с отходами и вторичными материальными ресурсами (на примере строительного комплекса) // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 514–526. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.514-526

41. Куприн Р.Г., Цховребов Э.С., Ниязгулов У.Д. Правовое обеспечение и экономическое регулирование обращения с отходами и вторичными ресурсами // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 2 (153). С. 62–70.

42. Маликов А.Н., Чупис В.Н. Внедрение современной системы управления вторичными ресурсами и отходами как одно из главных направлений эколого-

гического обустройства хозяйственной деятельности // Поволжский торгово-экономический журнал. 2011. № 5 (21). С. 19–26.

43. Бабаев В.Н., Горох Н.П., Коринько И.В. Концепция экологизации и энергоресурсосбережения в системе управления вторичными материальными ресурсами мегаполиса // ВЕЖПТ. 2010. № 8 (46). С. 51–59.

44. Богатырев В.А., Богатырев А.В., Ефимов А.Ю. Ресурсосбережение как направление модернизации экономики // Организатор производства. 2011. Т. 48. № 1. С. 63–66.

45. Чепига П.Н. Совершенствование управления системой обращения с твердыми вторичными материальными ресурсами в Российской Федерации // Проблемы современной экономики. 2010. № 4 (36). С. 45–47.

46. Алексеев А.А., Карлик А.Е., Махатадзе Л.П. Развитие региональной системы управления вторичными материальными ресурсами: опыт проекта SE500 // Экономика и управление. 2013. № 4 (90). С. 12–18.

47. Mazzanti M., Zoboli R. Waste generation, waste disposal and policy effectiveness // Resources, Conservation and Recycling. 2008. Vol. 52. Issue 10. Pp. 1221–1234. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.07.003

48. Berninger K., Heikkilä L., Orjala M., Teräsväinän T. Waste management and recycling in Finland // Conference Presentation. 2010. Pp. 4–8.

49. Achilias D.S. Material Recycling — Trends and Perspectives. In Tech, 2012. 406 p.

50. Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B. Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs // Department of industrial engineering, university of Miami. 2012. 34 p.

51. Kurdve M. Digital assembly instruction system design with green lean perspective. Case study from building module industry // Procedia CIRP. 2017. Vol. 72. Pp. 762–767. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.118

52. Zhao Ya., Xiao G., Zhou Ji., Wu Ch. International comparison of the patterns in urban transition towards greening // Procedia Engineering. 2017. Vol. 198. Pp. 770–780. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.07.128

53. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М. : Мысль, 1990. 637 с.

54. Гизятов И.И. Методика комплексной оценки эффективности ресурсосбережения в промышленности региона // Экономический вестник Республики Татарстан. 2011. № 1. С. 18–35.

55. Алексеев И.В. Стратегии развития предприятий и государственное регулирование экономики: мон. М. : Изд-во УАДУ, 2010. 204 с.

56. Гирусов Э.В. и др. Экология и экономика природопользования. М. : Закон и право; ЮНИТИ, 2012. 455 с.

57. Дорогутина Д.Н. Важность внедрения наилучших доступных технологий // Молодой ученый. 2018. № 13. С. 229–231.
58. Тепаева С.В., Тюжакаева Н.И. Функционально-стоимостной анализ в ресурсосбережении // Молодой ученый. 2016. № 7. С. 1008–1010.
59. Пантелеев С.В. Теоретические аспекты ресурсосбережения // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 196–201.
60. Воронников И.Л. Актуальные проблемы ресурсосбережения в агроэкономике. Саратов : СГАУ, 2005. 219 с.
61. Роцектаев С.А. Финансово-инвестиционные основы государственного регулирования ресурсосбережения // Труды КубГТУ. Сер. Экономика и управление. 2003. Т. 2. С. 18–30.
62. Попов А.С. Стратегическое ресурсосбережение в рыночных условиях // Стратегия отраслевого взаимодействия. Научный сборник. Саратов : Научная книга, 2004. С. 34–48.
63. Савенко А.С. Регулярная система операционных улучшений как инструмент управления ресурсосбережением на предприятии // Проблемы управления в реальном секторе экономики: вызовы модернизации : мат. Междунар. конф. с выставкой новых технологий. М. : ГУУ, 2012. С. 34–42.
64. Черномуров Ф.М., Ануфриев В.П., Теслюк Л.М. Энерго- и ресурсосбережение в нефтегазохимическом комплексе. Екатеринбург : УФУ им. Б.Н. Ельцина, 2014. 253 с.
65. Ануфриев В.П., Мокроносов А.Г., Михайлов Н.Г. Эколого-экономическая оценка ресурсосбережения малой энергетики региона // Известия Уральского государственного экономического университета. 2018. № 19 (4). С. 94–106.
66. Шатохина Н.М., Мантулин А.М. Экономический механизм ресурсосбережения на предприятиях свеклосахарной промышленности и повышение эффективности его функционирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Сер. Экономика и управление. 2012. № 1. С. 19–28.
67. Пасынкова О.М. Разработка мероприятий по реализации целей ресурсосбережения // Актуальные проблемы экономики предпринимательства : межевзовский сб. науч. тр. 2001. Вып. 3. Ч. 3. С. 183–185.
68. Шумак Ж.Г., Орешикова О.В. Проблемы ресурсосбережения на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности в контексте их инновационного развития // Молодой ученый. 2013. № 5. С. 427–430.
69. Аксененко А.Ф., Новиков В.В., Сидоров В.И. и др. Методика учета и анализа себестоимости продукции / под ред. А.Д. Шеремета. М. : Финансы и статистика, 2014. 208 с.
70. Чикишев Д.В. Ресурсосбережение как экономическая категория // Транспортное дело России. 2011. № 3.
71. Шоколенко Е.А. Экономика ресурсосбережения как отрасль экономической науки и фактор повышения эффективности промышленного производства // Наука и образование : мат. VI Междунар. науч. конф. 2–3 марта 2006 г. 2006. Ч. 1. С. 350–353.
72. Каленюк А.А. Факторы, влияющие на процесс ресурсосбережения в микроэкономической системе предприятия // Вестник СГТУ. 2009. № 4 (40). С. 20–25.
73. Махаева Н.В. Основные проблемы ресурсосбережения в ЖКХ и пути их решения // Экономика природопользования и природоохраны : сб. статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2005. С. 91–93.
74. Косович Т.А. Организация системы управления ресурсосбережением на предприятиях газовой промышленности. Краснодар : Экоинвест, 2002. 328 с.
75. Безносков Г.А. Развитие экономического механизма ресурсосбережения в зерновом производстве: мон. Екатеринбург : Уральский ГАУ, 2016. 204 с.
76. Дорошенко Ю.А., Курбатова С.В. Сущность ресурсосбережения в новых экономических условиях // Российское предпринимательство. 2010. № 3 (2). С. 38–49.
77. Богатырев А.В., Ефимычев Ю.И. Организация ресурсосберегающих производств на промышленных предприятиях: мон. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского филиала Московского гуманитарно-экономического института, 2009. 365 с.
78. Энхтайвйн Д. Снижение энергоемкости ВВП — важный фактор повышения эффективности национального хозяйства // Альянсы и стратегические партнерства в условиях глобального экономического кризиса : мат. науч.-практ. конф. молодых ученых экономического факультета. 2010. С. 156–161.
79. Урусова С.В. Производство молока и основные направления ресурсосбережения в молочном скотоводстве Тверской области. МСХА, 1998. № 17580. С. 34–39.
80. Лоскутов С.А. Основные факторы, критерии и принципы ресурсосбережения в условиях современного хозяйствования // Вестник ВГУИТ. Сер. Экономика и управление. 2015. № 2. С. 272–279.
81. Березовский П.В., Исаева Л.И. Использование вторичных материальных ресурсов как фактор ресурсосбережения // Записки Горного института. 2005. Т. 161. С. 147–149.
82. Хансеев Р.И. Ресурсосбережение как фактор повышения эффективности производства // Экономические науки. 2011. № 79. С. 50–53.

83. Мелехин Е.С. Ресурсосбережение как главный фактор развития экономики страны в современных условиях // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. 2015. № 5. С. 73–76.
84. Посметьев В.И., Зеликов В.А. Энергосбережение — эффективный путь повышения экологической безопасности // Экология Центрально-Черноземной области России. 2008. № 1–2. С. 71–76.
85. Ракутько С.А. Энергосбережение как фактор экологической безопасности // Экология и безопасность жизнедеятельности : VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2008. С. 37–40.
86. Кулигин П.А. Использование инновационных технологий для достижения энергоэффективности и энергосбережения — путь к энергетической безопасности страны // Записки Горного института. 2011. Т. 191. С. 121–124.
87. Пузакова К.А. Энергосбережение как фактор обеспечения национальной энергетической безопасности Российской Федерации // Контентус. 2016. № 2 (43). С. 50–53.
88. Плоткин Б.К., Плецц С.Г., Мармышева Л.Н., Дергаль П.П. Методологические основы экономической безопасности и ресурсосбережения // Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сб. науч. тр. VI Всероссийской науч.-практ. конф. 2014. С. 127–131.
89. Филимонова Л.А., Скворцова Н.К. Ресурсосбережение — есть инструмент техносферной безопасности // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке : сб. докладов XX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 383–391.
90. Юров А.И. Ресурсосбережение и экология — стимул экономического роста и основа безопасности жизнедеятельности региона // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 3 (15). С. 81–86.
91. Тищенко Л.И. Ресурсосбережение как важное направление жизнедеятельности человечества в условиях энергетического кризиса // Современные инновационные технологии и проблемы устойчивого развития общества : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 228–231.
92. Кравчук И.Л., Смолин А.В. Возможности и потенциал системы обеспечения безопасности, способствующие экономии ресурсов // Проблемы недропользования. 2015. № 1 (4). С. 123–132.
93. Шумаев М.А. Теория и практика ресурсосбережения : мон. М. : Русайнс, 2016. 234 с.
94. William Edwards Deming. The New Economics for Industry. Government. Education. М. : Ecsmo, 2006. 208 p.
95. Stiglitz J.E., Sen A., Fitoussi J.-P. Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress. 2009. 291 p.
96. Потравный И.М., Вега А.Ю., Фоменко А.А. Ресурсосбережение как фактор повышения экологической и энергетической эффективности экономики и обеспечения социальных стандартов жизни населения // Плехановский научный бюллетень. 2012. № 1 (1). С. 45–60.
97. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции. М. : Экономика, 1986. 472 с.
98. Амиров Ю.Д., Яновский Г.А. Ресурсосбережение и качество продукции. М. : Издательство стандартов, 1987. 96 с.
99. Соколовская Г.А., Сигарева Т.С. Ресурсосбережение на предприятиях. М. : Экономика, 1998. 156 с.
100. Топузов Н.К., Алабугин А.А. Новая парадигма и методы инновационного управления ресурсосбережением // Креативная экономика. 2010. Т. 4. № 7. С. 19–27.
101. Кинаш И.А. Организация системы управления ресурсосбережением на предприятии // Austrian Journal of Humanities and Social Sciences. 2015. № 11–12.
102. Моргун Т.Н., Соловьев К.С., Тищенко Г.З. Формирование механизма управления ресурсосбережением на промышленном предприятии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 12–17.
103. Благодаров А.В., Борисовский Э.И., Матушкин М.А., Мельников А.Н. Внутрифирменное управление материальными ресурсами. Саратов : Изд-во «Центр Саратовского гос. соц.-экон. ун-та», 2000. 260 с.
104. Аникьева Е.А. Анализ методов ресурсосбережения в промышленной логистике деятельности предприятий // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 10. С. 34–39.
105. Камилев М.К. Социально-экономический механизм ресурсосбережения в аграрной экономике. М. : Анкил, 1999. 171 с.
106. Исмаилов Р.Х. Методы ресурсосбережения на предприятиях машиностроения // Вопросы инновационной экономики. 2012. № 3. С. 32–39.
107. Астафьева О.Е. Управление природопользованием и ресурсосбережением. М. : ГУУ, 2010. 271 с.
108. Москалева Е.Г., Кузнецов М.Е. Анализ производственных затрат в реализации ресурсосбережения // Экономика и социум. 2015. № 1–3 (14). С. 1357–1363.
109. Москалева Е.Г., Дергунова Е.О. Стратегия управления эффективным ресурсопотреблением // Экономика и социум. 2015. № 1–3 (14). С. 1255–1260.
110. Зайцев Н.Л. Экономика промышленного предприятия. М. : ИНФРА-М, 1998. 336 с.
111. Свинооров Ю.А. Ресурсосбережение как фактор устойчивого развития предприятия // Экономика. Менеджмент. Инновации. 2017. Т. 1. № 1–1 (7). С. 28–41.

112. Мешалкин В.П., Саркисов П.Д. Ресурсосбережение — важнейший фактор экономической эффективности работы химических предприятий // Российское предпринимательство. 2001. Т. 2. № 9. С. 10–15.
113. Абросимова А.А., Шалабаев П.С. Связь бережливого производства с устойчивым развитием промышленных предприятий // Российское предпринимательство. 2013. Т. 14. № 24. С. 78–83.
114. Захаров Е.А., Шумский С.Н. Ресурсосбережение на предприятиях автомобильного транспорта. Волгоград : ВолгГТУ, 2011. 69 с.
115. Мингалеев Г.Ф., Ахмадиев Р.Я. Экономическое обоснование ресурсосбережения на предприятии и в народном хозяйстве. Казань : Унипресс, 2002. 95 с.
116. Лебединский Ю.П., Склянкин Ю.В., Попов П.И. Ресурсосбережение и экология. Киев : Политиздат Украины, 1990. 221 с.
117. Гановичева Л.Н. Ресурсосбережение и инновации как основа экономической модели развития регионов // Проблемы современной экономики. 2009. № 31. С. 20–21.
118. Айрапетова А.Г. Формирование системы ресурсосбережения: теоретико-методологические аспекты. СПб. : СПбГУЭФ, 1999. 36 с.
119. Назарбаев Н.А. Стратегия ресурсосбережения и переход к рынку. М. : Машиностроение, 1992. 351 с.
120. Резепов М.Ю. Ресурсный потенциал: понятие, механизм регулирования. Саратов : Науч. кн., 2003. 40 с.
121. Баяндурян Г.Л., Лушиников Р.Л. Инструменты регулирования ресурсосбережения: позитивные и негативные аспекты // Сфера услуг: инновации и качество. 2011. № 3. URL: http://journal.kfrgteu.ru/files/1/2011_3_3.pdf
122. Гутаев Р.Т. Принципы ресурсосбережения и рационального природопользования // Интеграция современных научных исследований в развитие общества : сб. мат. II Межд. науч.-практ. конф. Западно-Сибирский научный центр. 2017. С. 159–162.
123. Хоконова М.Б. Принципы рационального природопользования и ресурсосбережения // Вектор развития современной науки : сб. мат. X Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 1206–1209.
124. Мюллер Р.У. Сущность и классификация инноваций // Фундаментальные исследования. 2012. № 6–1. С. 244–248.
125. Агарков С.А., Кузнецова Е.С., Грязнова М.О. Инновационный менеджмент и государственная инновационная политика. М. : Издательство «Академия Естествознания», 2011. 123 с.
126. Бабина Е.Н. Региональные особенности функционирования экономического механизма рационального природопользования. Ставрополь : Ставропольбланкиздат, 2010. 437 с.
127. Поликанов П.И., Володин Р.С. Механизм экологизации хозяйственной деятельности российских организаций // МНИЖ. 2014. № 4–3 (23). С. 67–70.
128. Цховребов Э.С. Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте. М. : Космосинформ, 1994. 354 с.
129. Цховребов Э.С. Эколого-экономические аспекты обращения строительных материалов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2013. Т. 19. № 3. С. 10–14.
130. Цховребов Э.С., Яйли Е.А., Церенова М.П., Юрьев К.В. Обеспечение экологической безопасности при проектировании объектов недвижимости и проведении строительных работ. СПб. : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2013. 360 с.
131. Цховребов Э.С., Голубин А.К. Особенности технико-экономического обоснования ресурсосберегающей модели комплексной системы обращения с отходами // Кластерные инициативы в формировании прогрессивной структуры национальной экономики : сб. науч. тр. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск : Юго-Западный гос. ун-т, 2017. С. 272–282.
132. Шевченко А.С., Ниязгулов У.Д., Цховребов Э.С. Использование ресурсосберегающих технологий и возобновляемых источников энергии в строительстве // Качество. Инновации. Образование. 2017. № 12 (151). С. 34–40.
133. Tshovrebov E., Velichko E., Shevchenko A. Methodological Approaches to a Substantiation Resource — and Energetically Effective Economic Model of Object of Placing of a Waste // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 1296–1305.
134. Velichko E., Tskhovrebov E. Insights into the state of affairs and possible ways to improve secondary material waste management // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04066. DOI: 10.1051/matec-conf/201819604066
135. Meadows D.H. et al. The Limits to Growth. New York, Potomac Associates, 1972. 145 p.
136. Daly H. The economic growth debate: What some economists have learned but many have not // Journal of Environmental Economics and Management. 1987. Vol. 14. Issue 4. Pp. 323–336. DOI: 10.1016/0095-0696(87)90025-8
137. Daly H. Ökologische. Ökonomie. Konzepte, Analysen, Politik. Nachhaltige Entwicklung. Wie ist nachhaltiges Wirtschaft machbar? Opladen: Leske und Budrich, 2003. Pp. 89–96.
138. Taylor J., Uhlig H. Solving nonlinear stochastic growth models: a comparison of alternative

- solution methods // Journal of Business & Economic Statistics. 1990. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/07350015.1990.10509766
139. *Одум Е.* Экология / пер. с англ. В.В. Алпатова. М. : Просвещение, 1968. 168 с.
140. *Титенберг Т.* Экономика природопользования и охрана окружающей среды. М. : Олма-Пресс, 2001. 467 с.
141. *Buts U.* Theory and methods of resource saving management in agricultural production. Saarbrecken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 201 p.
142. *Danilovich P.A.* Energy saving, alternative sources of energy // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Issue 3. Pp. 405–412.
143. *Lähde E., Di Marino M.* Multidisciplinary collaboration and understanding of *green* infrastructure Results from the cities of Tampere, Vantaa and Jyväskylä (Finland) // Urban Forestry & Urban Greening. 2019. Vol. 40. Pp. 63–72. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.03.012
144. *Nickel W.* Recycling-Handbuch: Strategien — Technologien — Produkte. Düsseldorf : VDI Verlag, 1996. 526 p.
145. *Bani M.S., Rashid Z.A., Hamid K.H.K.* The Development of Decision Support System for Waste Management: a Review // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. No. 25. Pp. 161–168.
146. *Antrekowitsch J., Steinlechner S.* The recycling of heavy-metal-containing wastes: mass balances and economical estimations // JOM. 2011. Vol. 63. Issue 1. Pp. 68–72. DOI: 10.1007/s11837-011-0017-2
147. *Bedrunka K., Malik K.* Sustainable development as a contemporary concept and strategy of regional development // Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. 2014. Issue 339. Pp. 11–22. DOI: 10.15611/pn.2014.339.01
148. *Bribian I., Ferreira G., Uson A., Vasquez D.* Study of the environmental performance of end-of-life tyre recycling through a simplified mathematical approach // Thermal Science. 2012. Vol. 16. Issue 3. Pp. 889–899. DOI: 10.2298/tsci120212129a
149. *Ostertag K., Brandstetter P., Albrecht S., Fröhling M., Schultmann F., Trippe F.* Ressourceneffizienz potenzieren: Der Beitrag des BMBF-Förderschwerpunktes, in Recycling und Rohstoffe Band 5, Hrsg: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2012. 34 p.
150. *Rao S.R.* Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Oxford, UK, 2006. 558 p.
151. *Tennant-Wood R.* Going for zero: A comparative critical analysis of zero waste events in southern New South Wales // Australasian Journal of Environmental Management. 2003. Vol. 10. Issue 1. Pp. 46–55. DOI: 10.1080/14486563.2003.10648572
152. *Маковецька Ю.М.* Вторинне ресурсокористування в Україні і регіональні аспекти його становлення // Регіональна економіка. 2011. № 3. С. 172–180.
153. *Мельник Л.Г.* Екологічна економіка. Сумы: Университетська книга, 2001. 350 с.
154. *Половнікова С.Ю.* Ресурсозбереження в розширеному відтворенні трансформаційної економіки України: Автореферат дис. ... канд. екон. наук. Дніпропетровськ : ДДАУ, 2003. 20 с.
155. *Tshangela M.* Environmental technology assessment for enhanced green economy transition in South Africa // International Journal of African Renaissance Studies. 2014. Vol. 9. Issue 2. Pp. 213–226. DOI: 10.1080/18186874.2014.987964
156. *Steiner A.* Focusing on the good or the bad: what can international environmental law do to accelerate the transition towards a green economy? // American University International Law Review. 2010. Vol. 25. Issue 5. Pp. 843–875.
157. *Pretty J.* The Consumption of a Finite Planet: Well-Being, Convergence, Divergence and the Nascent Green Economy // Environmental and Resource Economics. 2013. Vol. 55. Issue 4. Pp. 475–499. DOI: 10.1007/s10640-013-9680-9
158. *Wysokińska Z.* Transition to a Green Economy in the Context of Selected European and Global Requirements for Sustainable Development // Comparative Economic Research. 2013. Vol. 16. Issue 4. Pp. 203–226. DOI: 10.2478/cer-2013-0034
159. *Hamdouch A., Depret M.* Sustainable development policies and the geographical landscape of the green economy; actors, scales and strategies // Finisterra. 2013. Vol. 47. Issue 94. Pp. 49–80. DOI: 10.18055/finis2681
160. *Kurpayanidi K.* Innovation component of the business environment as a factor enhancing economic growth // Economics. 2014. № 1 (2). Pp. 6–9.
161. *Ehresman T., Okereke C.* Environmental justice and conceptions of the green economy // International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics. 2015. Vol. 15. Issue 1. Pp. 13–27. DOI: 10.1007/s10784-014-9265-2
162. *Borel-Saladin J.M., Turok I.N.* The Green Economy: Incremental Change or Transformation? // Environmental Policy and Governance. 2013. Vol. 23. Issue 4. Pp. 209–220. DOI: 10.1002/eet.1614
163. *Chernykhivska A.* Modern perspectives of development of «green» economy // Economic Processes Management. 2015. Issue 1. Pp. 108–115.
164. *Dumitru Raluca-Ana-Maria.* Green economy — risks and challenges of sustainable development // Internal Auditing & Risk Management. 2013. Vol. 8. Issue 1. Pp. 38–52.

165. Улицкий В.А., Васильвицкий А.Е., Плущевский М.Б. Промышленные отходы и ресурсосбережение. Отечественный и зарубежный опыт законодательного и нормативного обеспечения / под ред. А.Д. Козлова и Т.В. Боравской. М. : САШКО, 2006. 368 с.

166. Баяндурян Г.Л., Лушников Р.Л. Инструменты регулирования ресурсосбережения: позитивные и негативные аспекты // Сфера услуг: инновации и качество. 2012. № 3. URL: http://journal.kfrgteu.ru/files/1/2011_3_3.pdf

167. Федорова Н.В., Мохов В.А., Бабушкин А.Ю. Анализ зарубежного опыта использования золошлаковых отходов ТЭС и возможностей мультиагентного моделирования процессов утилизации (обзор) // Экология промышленного производства. 2015. № 3 (91). С. 2–7.

168. Vishnya B., Domanskaya A. et al. Prospects of granular high calcium ash utilisation in the manufacture of building materials // 13-th International Baustofftagung Ibasil. Weimar. 1997. Pp. 375–379.

169. Горина А.П., Махаева Н.В. Изучение зарубежного опыта ресурсосбережения в сфере ЖКХ в рамках курса «Экономика предприятий» // Интеграция образования. 2015. № 3. С. 191–199.

170. Астафьев А. Энергосбережение в жилищной сфере. Проблемы, поиски решения // Строительные материалы. 2014. № 50. С. 11.

171. Крыгина А.М., Гусакова Е.А. Развитие регионального жилищного строительства на основе моделирования и оптимизации организационно-технических решений в сфере экологизации и ресурсосбережения // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 56–58.

172. Высоцкий В.И., Высоцкая И.Ф. Энергосбережение и энергоэффективность объектов ЖКХ — составная часть процесса экологической безопасности // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2016. № 2–3 (2627). С. 105–108.

173. Ткаченко Т.Б., Белоусова Л.С. Управление ресурсосбережением в строительном комплексе

в аспекте экологизации экономики // Научные ведомости БелГУ. 2012. № 19–1 (138). С. 17–20.

174. Прохоцкий Ю.М., Лунев Г.Г. Организационные и экономические проблемы использования вторичных строительных ресурсов при реконструкции объектов недвижимости. Инноватика и экспертиза. М. : ФГУ НИИ РИНКЦЭ, 2010. Вып. 1 (4). 195 с.

175. Звягина А.И. Вторичные сырьевые ресурсы и технологии их использования для производства строительных материалов // Технология машиностроения. 2007. № 4. С. 50–51.

176. Snoonian D. How green buildings are smarter and safer energy-saving technology can have unexpected side benefits for building safety and intelligence. one case study shows us how // Architectural Record. 2003. Vol. 191. Issue 2. Pp. 100–101.

177. Crawford R. Life cycle assessment in the built environment. Spon Press, New York, 2011. 272 p.

178. Goldstein B., Rasmussen F. LCA of Buildings and the Built Environment // Life Cycle Assessment. 2018. Pp. 695–722. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3_28

179. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J.-O. The importance of life-cycle based planning in maintenance and energy renovation of multifamily buildings // Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 44. Pp. 715–725. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.033

180. Koen Steemers. Integrated Building Design / Environmental Design of Urban Buildings. An Integrated Approach / Edited by Mat Santamouris. Earthscan. London, 2006. Pp. 310–318.

181. Уварова С.С., Снурницын А.Н., Перов Р.В. Систематизация критериев эффективности «Зеленого» строительства // Научный Вестник Воронежского ГАУ. 2015. № 2 (13) С. 79–82.

182. Загускин Н.Н. «Зеленое» строительство — основное направление трансформационных изменений инвестиционно-строительной сферы // Проблемы современной экономики. 2013. № 4 (48). С. 315–319.

Поступила в редакцию 15 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2019 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: Эдуард Станиславович Цховребов — кандидат экономических наук, доцент; Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (НИИ «ЦЭПП»); 141006, г. Мытищи, Олимпийский пр-т, д. 42; РИНЦ ID: 470064; rebrovstanislav@rambler.ru.

REFERENCES

1. Isakov V.M., Tskhovrebov E.S. *Legal framework for environmental protection*. Moscow, Moscow State Pedagogical University, Ministry of Internal Affairs of Russia, 2004; 100. (rus.).
2. Tskhovrebov E.S., Lebin A.N., Belousov V.G. The newest history of development of nature protection activity in Russia. *Bulletin of Kostroma State University named after N.A. Nekrasova*. 2012; 18(2):192-196. (rus.).
3. Tskhovrebov E.S., Velichko E.G. Ecological safety of construction materials: basic historical stages. *Vestnik MGSU*. [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(1):(100):26-35. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.26-35 (rus.).
4. Tskhovrebov E.S., Tsutskareva G.I., Dudenkov S.V., Golubin A.K., Shubov L.Ya., Skobelev D.O. et al. *From VIVR to CEPP: A Brief History of the All-Union Institute of Secondary Resources and Waste Management in Russia and in the World*. Moscow, Publishing house "Aquarius-South", 2017; 190. (rus.).
5. Odessa V.I. *Secondary resources: economic mechanism of use*. Moscow, Economics, 1988; 157. (rus.).
6. Sorg T.J., Bendixen T.U., Quartley E. et al. *Solid waste management* / ed. D. Wilson; abbr. trans. from English E.G. Teterina and A.S. Skotnikova. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985; 336. (rus.).
7. Yaremenko Yu.V. Economic Growth and Structural Policy. *Forecasting Problems*. 2001; 1:6-14. (rus.).
8. Ganovicheva L.N. Resource saving and innovations and the basis for the economic model of regional development. *Problems of Modern Economics*. 2009; 3(31):298-299. (rus.).
9. Malinetsky G.G. Recycling. A look from the future. *Waste Recycling*. 2011; 3(33):2-8. (rus.).
10. De Haan J., Lundstrom S., Sturm J.-E. Market-Oriented Institutions and Policies and Economic Growth: A Critical Survey. *Journal of Economic Surveys*. 2006; 20(2):157-191. DOI: 10.1111/j.0950-0804.2006.00278.x
11. Potapova I.Yu., Astaf'yeva O.E. Russian and foreign governmental regulation and promotion of resource saving. *Internet journal "Science of Science"*. 2015; 7:5(30):81. (rus.).
12. Barsky L.A., Bebachuk B.Ts., Hoffman K.G., Gusev A.A. Methods of environmental and economic substantiation of the development of non-waste industries. *Economics and Mathematical Methods*. 1987; XXIII(2). (rus.).
13. Murray R. Zero waste. *Greenpeace Environmental Trust*. 2002; 211.
14. Dubois M. Economic benefits of the circular economy — A critical review of the literature and opportunities for CGE modelling, Draft paper prepared for the OECD Working Party on Resource Productivity and Waste, ENV/EPOC. 2015; 123.
15. Vallero D.A., Brasier C. *Sustainable Design: The Science of Sustainability and Green Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2008; 333. DOI: 10.1002/9780470259603
16. Berninger K., Heikkilä L., Kolev Z., Orjala M., Terävaäinen T. Waste management and recycling in Finland. *Conference Presentation*. 2010; 173.
17. Zaman A.U. A comprehensive review of the development of zero waste management: lessons learned and guidelines. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 91:12-25. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.013
18. Aganbegyan A.G., Alexandrova E.I., Kostyashkin H.A. *The economic mechanism for the efficient use of consumption resources*. Moscow, Science Publ., 1988; 541. (rus.).
19. Andrianov V.M., Sokolova H.A., Uskov M.E. *Integrated use of raw materials in industry*. Moscow, Economics Publ., 1988; 301. (rus.).
20. Drozdovsky E.E. *Methodological problems of rationalizing resource use*. Irkutsk, Publishing House of Irkutsk University, 1986; 170. (rus.).
21. Crolls O.A. *Material and technical supply: resource-saving activity*. Moscow, Economics Publ., 1988; 418 (rus.).
22. Leikina K.B. *Liquidation of losses is a reserve for intensification of production*. Moscow, Economics Publ., 1985; 213. (rus.).
23. Pirogov N.L., Sushon S.P., Zavalko A.G. *Secondary Resources: Efficiency. Experience. Prospects*. Moscow, Economics Publ., 1987; 312. (rus.).
24. Pole A.M. *Material consumption of products. Issues of decline*. Moscow, Economics Publ., 1986; 139. (rus.).
25. Vilensky M.A. Efficiency of resource-saving technologies. *Voprosy Ekonomiki*. 1986; 10:32-37. (rus.).
26. Elgizawy S.M., El-Haggag S.M., Nassar K. Slum development using zero waste concepts: construction waste case study. *Procedia Engineering*. 2016; 145:1306-1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168
27. Hart J., Adams K., Giesekam J., Tingley D.D., Pomponi F. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP*. 2019; 80:619-624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015
28. Telizhenko O.M. Concept of integrated waste management as recoverable resources in product cycle. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 2012; 1(3):312-323.
29. Nosko P.A. Trends in the development of the closed-loop economy in the European Union. *Waste and resources online magazine*. 2019; 1(6):10. URL: <https://resources.today/PDF/04ECOR119.pdf> DOI: 10.15862/04ECOR119 (rus.).

30. Bobylev S.N., Zakharov V.M. Green economy and modernization. Environmental and economic foundations of sustainable development. *Bulletin "Towards the sustainable development of Russia"*. 2012; 60:90. (rus.).
31. Telichenko V.I. Green technologies of living environment: concepts, terms, standards. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12:4(103):364-372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372 (rus.).
32. Nikitin G.S., Os'makov V.S., Skobelev D.O. Green Economy. Improving the Institutional Infrastructure for Creating Conditions. *Kompetentnost'*. 2017; 3(144):29-33. (rus.).
33. Nikonorov S.M. Toward a green economy through green finance, bioeconomics and sustainable development. *Russian Political Science*. 2017; 3(4):12-15. (rus.).
34. Komarova O.P., Medvedeva L.N., Kozenko K.Y. Promoting green technologies as a basis for the strategic development Russian urban and rural settlements. *Fundamental Research*. 2015; 11-5:1009-1113. (rus.).
35. Rodionova I.A., Lipina S.A. Green economy in Russia: model and forecast of development. *Fundamental Research*. 2015; 2-24:5462-5466. (rus.).
36. Cherdakova M.P. Resource-saving as state policy. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*. 2013; 4:432-435. (rus.).
37. Vishnyakov Y.D., Volostnov B.I., Kiseleva S.P., Polyakov V.V. Improving the mechanism of stimulating innovative development in the field of environmental management and environmental safety. *Problems of Mechanical Engineering and Automation*. 2013; 2:3-9. (rus.).
38. Golub I.N., Agabekyan R.L. *State regulation of resource conservation*. Krasnodar, 2008; 274. (rus.).
39. Bogomolova I.P., Krivenko E.I., Stryapchih E.S. Ensure economic security state based control resource saving. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2018; 5:16-23. (rus.).
40. Tskhovrebov E.S. Economic and legal aspects of management of wastes and secondary material resources (on the example of construction complex). *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:4(115):514-526. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.514-526 (rus.).
41. Kuprin R.G., Tshovrebov E.S., Nijazgulov U.D. Legal maintenance and economic regulation of the reference with a waste and secondary resources. *Quality. Innovation. Education*. 2018; 2(153):62-70. (rus.).
42. Malikov A.N., Chupis V.N. The introduction of a modern system of secondary resources and waste management as one of the main directions of the ecological arrangement of economic activity. *Volga Trade and Economic Journal*. 2011; 5(21):19-26. (rus.).
43. Babaev V.N., Gorokh N.P., Korinko I.V. The concept of greening and energy saving in the system of managing secondary material resources of a megalopolis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010; 8(46):51-59. (rus.).
44. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Efimych A.Yu. Resource conservation as a direction of economic modernization. *Production Organizer*. 2011; 48(1):63-66. (rus.).
45. Chepiga P.N. Improving the management of the system of handling solid secondary material resources in the Russian Federation. *Problems of the Modern Economy*. 2010; 4(36):45-47. (rus.).
46. Alekseev A.A., Karlik A.E., Makhatazde L.P. Development of a regional system for managing secondary material resources: experience of the SE500 project. *Economics and Management*. 2013; 4(90):12-18. (rus.).
47. Mazzanti M., Zoboli R. Waste generation, waste disposal and policy effectiveness. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008; 52(10):1221-1234. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.07.003
48. Berninger K., Heikkilä L., Orjala M., Teräväinen T. Waste management and recycling in Finland. *Conference Presentation*. 2010; 4-8.
49. Achilias D.S. *Material Recycling — Trends and Perspectives*. In Tech, 2012; 406.
50. Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B. Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs. *Department of industrial engineering, university of Miami*. 2012; 34.
51. Kurdve M. Digital assembly instruction system design with green lean perspective. Case study from building module industry. *Procedia CIRP*. 2017; 72:762-767. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.118
52. Zhao Ya., Xiao G., Zhou Ji., Wu Ch. International comparison of the patterns in urban transition towards greening. *Procedia Engineering*. 2017; 198:770-780. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.07.128
53. Reimers N.F. *Nature Management: Dictionary*. Moscow, Thought, 1990; 637. (rus.).
54. Gizyatov I.I. Methodology for a comprehensive assessment of the effectiveness of resource conservation in the industry of the region. *Economic Bulletin of the Republic of Tatarstan*. 2011; 1:18-35. (rus.).
55. Alekseev I.V. *Enterprise Development Strategies and Government Regulation of the Economy: monograph*. Moscow, Publishing House of the Academy of Public Administration, 2010; 204. (rus.).
56. Girusov E.V. et al. *Ecology and environmental economics*. Moscow, Law and Law; UNITY, 2012; 445. (rus.).
57. Dorogutina D.N. The importance of introducing the best available technology. *Young Scientist*. 2018; 13:229-231. (rus.).

58. Tepaeva S.V., Tyuzhakaeva N.I. Functional-cost analysis in resource conservation. *Young Scientist*. 2016; 7:1008-1010. (rus.).
59. Panteleev S.V. Theoretical aspects of resource conservation. *Young Scientist*. 2017; 45:196-201. (rus.).
60. Vorotnikov I.L. *Actual problems of resource conservation in the agricultural economy*. Saratov, SSAU, 2005; 219. (rus.).
61. Roshchektaev S.A. Financial and investment fundamentals of state regulation of resource conservation. *Transactions of KubSTU. Series "Economics and Management"*. 2003; 2:18-30. (rus.).
62. Popov A.S. *Strategic resource saving in market conditions. Strategy of industry interaction. Scientific collection*. Saratov, Scientific Book, 2004; 34-48. (rus.).
63. Savenko A.S. The regular system of operational improvements as a tool for managing resource saving at the enterprise. *Management Problems in the Real Sector of the Economy: Challenges of Modernization : materials of the International Conference with the Exhibition of New Technologies*. Moscow, GUU, 2012; 34-42. (rus.).
64. Chernomurov F.M., Anufriev V.P., Teslyuk L.M. *Energy and resource saving in the petrochemical complex*. Yekaterinburg, UFU im. B.N. Yeltsin, 2014; 253. (rus.).
65. Anufriev V.P., Mokronosov A.G., Mikhailov N.G. Ecological and economic assessment of resource conservation of small energy in the region. *Bulletin of the Ural State Economic University*. 2018; 19(4):94-106. (rus.).
66. Shatokhina N.M., Mantulin A.M. The economic mechanism of resource conservation at the enterprises of the sugar beet industry and increasing the efficiency of its functioning. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. Series: Economics and Management*. 2012; 1:19-28. (rus.).
67. Pasynkova O.M. Development of measures for the implementation of resource conservation goals.: *Actual problems of the economy of entrepreneurship : Interuniversity collection of scientific papers*. 2001; 3(3):183-185. (rus.).
68. Shumak Zh.G., Oreshnikova O.V. Resource-saving problems at meat processing enterprises in the context of their innovative development. *Young Scientist*. 2013; 5:427-430. (rus.).
69. Aksenenko A.F., Novikov V.V., Sidorov V.I. et al. *Methods of accounting and analysis of production costs* / Ed. HELL. Sheremet. Moscow, Finance and Statistics, 2014; 208. (rus.).
70. Chikishev D.V. Resource conservation as an economic category. *Transport Business of Russia*. 2011; 3. (rus.).
71. Shokolenko E.A. Resource-saving economics as a branch of economic science and a factor in increasing the efficiency of industrial production. *Science and Education : Materials of the VI International Scientific Conference, March 2-3, 2006*. 2006; 1:350-353. (rus.).
72. Kalenyuk A.A. Factors affecting the process of resource conservation in the microeconomic system of an enterprise. *Bulletin of SSTU*. 2009; 4(40):20-25. (rus.).
73. Makhaeva N.V. The main problems of resource conservation in housing and communal services and ways to solve them. *Economics of Nature Management and Environmental Protection : Collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2005; 91-93. (rus.).
74. Kosovich T.A. *Organization of a resource-saving management system at gas industry enterprises*. Krasnodar, Ecoinvest Publishing House, 2002; 328. (rus.).
75. Beznosov G.A. *The development of the economic mechanism of resource conservation in grain production: monograph*. Yekaterinburg, Ural State Agrarian University, 2016; 204. (rus.).
76. Doroshenko Yu.A., Kurbatova S.V. The essence of resource conservation in the new economic conditions. *Russian Entrepreneurship*. 2010; 3(2):38-49. (rus.).
77. Bogatyrev A.V., Efimychev Yu.I. *Organization of resource-saving production at industrial enterprises: monograph*. N. Novgorod: Publishing house of the Nizhny Novgorod branch of the Moscow Humanitarian-Economic Institute, 2009; 365. (rus.).
78. Enhtawine D. Reducing the energy intensity of GDP is an important factor in increasing the efficiency of the national economy. *Alliances and Strategic Partnerships in the Global Economic Crisis : materials of the scientific-practical conference of young scientists of the Faculty of Economics*. 2010; 156-161. (rus.).
79. Urusova S.V. *Milk production and the main areas of resource conservation in dairy cattle breeding in the Tver region*. 1998; 17580:34-39. (rus.).
80. Loskutov S.A. The main factors, criteria and principles of resource conservation in modern management. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Economics and Management*. 2015; 2:272-279. (rus.).
81. Berezovsky P.V., Isaeva L.I. The use of secondary material resources as a factor of resource conservation. *Notes of the Mining Institute*. 2005; 161:147-149. (rus.).
82. Khansevyarov R.I. Resource conservation as a factor in increasing production efficiency. *Economic Sciences*. 2011; 79:50-53. (rus.).
83. Melekhin E.S. Resource conservation as the main factor in the development of the country's economy in modern conditions. *Mineral Resources of Russia: Economics and Management*. 2015; 5:73-76. (rus.).
84. Posmetiev V.I., Zelikov V.A. Energy conservation — an effective way to improve environmental safety. *Ecology of the Central Black Earth Region of Russia*. 2008; 1-2:71-76. (rus.).

85. Rakutko S.A. Energy conservation as a factor of environmental safety. *Ecology and life safety : VIII International scientific and practical conference*. 2008; 37-40. (rus.).
86. Kuligin P.A. The use of innovative technologies to achieve energy efficiency and energy saving is the path to the country's energy security. *Notes of the Mining Institute*. 2011; 191:121-124. (rus.).
87. Puzakova K.A. Energy conservation as a factor in ensuring the national energy security of the Russian Federation. *Contentus*. 2016; 2(43):50-53. (rus.).
88. Plotkin B.K., Pleschits S.G., Marmysheva L.N., Dergal P.P. Methodological foundations of economic security and resource conservation. *Safety in emergency situations : Collection of scientific papers of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2014; 127-131. (rus.).
89. Filimonova L.A., Skvortsova N.K. Resource-saving — there is an instrument of technosphere security. *Northern Sea Route, water and land transport corridors as the basis for the development of Siberia and the Arctic in the XXI century : Collection of reports of the XX International scientific and practical conference*. 2018; 383-391. (rus.).
90. Yurov A.I. Resource conservation and ecology — an incentive for economic growth and the basis of the region's life safety. *Vestnik APK Stavropol*. 2014; 3(15):81-86. (rus.).
91. Tishchenko L.I. Resource conservation as an important direction of human life in the context of the energy crisis. *Modern innovative technologies and problems of sustainable development of society : Materials of the IX international scientific and practical conference*. 2016; 228-231. (rus.).
92. Kravchuk I.L., Smolin A.V. Opportunities and potential of the security system contributing to resource saving. *Subsoil use Problems*. 2015; 1(4):123-132. (rus.).
93. Shumaev M.A. *Theory and practice of resource conservation : a monograph*. Moscow, Rusains, 2016; 234. (rus.).
94. William Edwards Deming. *The New Economics for Industry. Government. Education*. Moscow, Ecsmo, 2006; 208.
95. Stiglitz J.E., Sen A., Fitoussi J.-P. *Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress*. 2009; 291.
96. Potravny I.M., Vega A.Yu., Fomenko A.A. Resource conservation as a factor in improving the environmental and energy efficiency of the economy and ensuring social standards of life of the population. *Plekhanov Scientific Bulletin*. 2012; 1(1):45-60. (rus.).
97. Feigenbaum A. *Product quality control*. Moscow, Economics, 1986; 472. (rus.).
98. Amirov Yu.D., Yanovsky G.A. *Resource conservation and product quality*. Moscow, Publishing house of standards, 1987; 96. (rus.).
99. Sokolovskaya G.A., Sigareva T.S. *Resource conservation in enterprises*. Moscow, Economics, 1998; 156. (rus.).
100. Topuzov N.K., Alabugin A.A. A new paradigm and methods of innovative resource-saving management. *Creative Economy*. 2010; 4(7):19-27. (rus.).
101. Kinash I.A. Organization of a resource-saving management system at an enterprise. *Austrian Journal of Humanities and Social Sciences*. 2015; 11-12. (rus.).
102. Morgun T.N., Soloviev K.S., Tischenkova G.Z. The formation of a resource-saving management mechanism at an industrial enterprise. *Modern Problems of Science and Education*. 2013; 6:12-17. (rus.).
103. Blagodarov A.V., Borisovsky E.I., Matushkin M.A., Melnikov A.N. *Intrafirm management of material resources*. Saratov, Publishing House "Center of the Saratov State socio-economic University", 2000; 260. (rus.).
104. Anikieva E.A. Analysis of resource saving methods in industrial logistics of enterprises. *Youth Scientific and Technical Bulletin*. 2014; 10:34-39. (rus.).
105. Kamilov M.K. *The socio-economic mechanism of resource conservation in the agricultural economy*. Moscow, Publ. Ankil firm, 1999; 171. (rus.).
106. Ismagilov R.Kh. Resource-saving methods at engineering enterprises. *Issues of innovative economy*. 2012; 3:32-39. (rus.).
107. Astafieva O.E. *Environmental management and resource conservation*. Moscow, GUU, 2010; 271. (rus.).
108. Moskaleva E.G., Kuznetsov M.E. Analysis of production costs in the implementation of resource conservation. *Economics and Society*. 2015; 1-3(14):1357-1363. (rus.).
109. Moskaleva E.G., Dergunova E.O. Management Strategy for Effective Resource Consumption. *Economics and Society*. 2015; 1-3(14):1255-1260. (rus.).
110. Zaitsev N.L. *Economics of an industrial enterprise*. Moscow, INFRA-M, 1998; 336. (rus.).
111. Svinoroev Yu.A. Resource conservation as a factor in the sustainable development of an enterprise. *Economics. Management. Innovation*. 2017; 1:1-1(7):28-41. (rus.).
112. Meshalkin V.P., Sarkisov P.D. Resource conservation — the most important factor in the economic efficiency of chemical enterprises. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2001; 2(9):10-15. (rus.).
113. Abrosimova A.A., Shalabaev P.S. The relationship of lean production with sustainable development of industrial enterprises. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2013; 14(24):78-83. (rus.).
114. Zakharov E.A., Shumsky S.N. *Resource saving at the enterprises of automobile transport*. Volgograd, VolGSTU, 2011; 69. (rus.).

115. Mingaleev G.F., Akhmadiev R.Ya. *The economic rationale for resource conservation in the enterprise and in the national economy*. Kazan, Unipress, 2002; 95. (rus.).
116. Lebedinsky Yu.P., Sklyankin Yu.V., Popov P.I. *Resource conservation and ecology*. Kiev, Political Publishing House of Ukraine, 1990; 221. (rus.).
117. Ganicheva L.N. Resource conservation and innovation as the basis of the economic model for the development of regions. *Problems of the Modern Economy*. 2009; 31:20-21. (rus.).
118. Ayrapetova A.G. *Formation of a resource-saving system: theoretical and methodological aspects*. St. Petersburg, SPbSUEF, 1999; 36. (rus.).
119. Nazarbayev N.A. *Resource Saving Strategy and Market Transition*. Moscow, Mechanical Engineering, 1992; 351. (rus.).
120. Rezepov M.Yu. *Resource potential: concept, regulation mechanism*. Saratov, Nauch. book, 2003; 40. (rus.).
121. Bayanduryan G.L., Lushnikov R.L. Resource Savings Regulation Instruments: Positive and Negative Aspects. *Services: Innovation and Quality*. 2011; 3. URL: http://journal.kfrgteu.ru/files/1/2011_3_3.pdf (rus.).
122. Gutaev R.T. The principles of resource conservation and environmental management. *Integration of modern scientific research into the development of society : Proceedings II Int. scientific and practical. conferences. West Siberian Scientific Center*. 2017; 159-162. (rus.).
123. Khokonova M.B. Principles of rational nature management and resource conservation. *Vector of development of modern science : Collection of materials X Int. scientific and practical. conf.* 2016; 1206-1209. (rus.).
124. Muller R.U. The essence and classification of innovations. *Fundamental research*. 2012; 6-1:244-248. (rus.).
125. Agarkov S.A., Kuznetsova E.S., Gryaznova M.O. *Innovation management and state innovation policy*. Moscow, Publishing House "Academy of Natural Sciences", 2011; 123. (rus.).
126. Babina E.N. *Regional features of the functioning of the economic mechanism of environmental management*. Stavropol, LLC Stavropolblankizdat, 2010; 437. (rus.).
127. Polikanov P.I., Volodin R.S. The mechanism of greening the economic activities of Russian organizations. *MNIZh*. 2014; 4-3(23):67-70. (rus.).
128. Tskhovrebov E.S. *Environmental protection in rail transport*. Moscow, Cosmosinform, 1994; 354. (rus.).
129. Tskhovrebov E.S. Environmental and economic aspects of the circulation of building materials. *Bulletin of the Kostroma State University named after N.A. Nekrasov*. 2013; 19(3):10-14. (rus.).
130. Tskhovrebov E.S., Yayli E.A., Tserenova M.P., Yuryev K.V. *Ensuring environmental safety in the design of real estate and construction work*. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 2013; 360. (rus.).
131. Tskhovrebov E.S., Golubin A.K. Features of the feasibility study of a resource-saving model of an integrated waste management system. *Cluster initiatives in the formation of a progressive structure of the national economy : Sat. scientific tr 3rd Int. scientific-practical conf.* Kursk, Southwestern State University, 2017; 272-282. (rus.).
132. Shevchenko A.S., Niyazgulov U.D., Tskhovrebov E.S. The use of resource-saving technologies and renewable energy sources in construction. *Quality. Innovation. Education*. 2017; 12(151):34-40. (rus.).
133. Tshovrebov E., Velichko E., Shevchenko A. Methodological Approaches to a Substantiation Resource — and Energetically Effective Economic Model of Object of Placing of a Waste. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 692:1296-1305.
134. Velichko E., Tskhovrebov E. Insights into the state of affairs and possible ways to improve secondary material waste management. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04066. DOI: 10.1051/matec-conf/201819604066
135. Meadows D.H., et al. *The Limits to Growth*. New York, Potomac Associates, 1972; 145. (rus.).
136. Daly H. The economic growth debate: What some economists have learned but many have not. *Journal of Environmental Economics and Management*. 1987; 14(4):323-336. DOI: 10.1016/0095-0696(87)90025-8
137. Daly H. *Ökologische. Ökonomie. Konzepte, Analysen, Politik. Nachhaltige Entwicklung. Wie ist nachhaltiges Wirtschaft machbar?* Opladen, Leske und Budrich, 2003; 89-96.
138. Taylor J., Uhlig H. Solving nonlinear stochastic growth models: a comparison of alternative solution methods. *Journal of Business & Economic Statistics*. 1990; 8(1):1-17. DOI: 10.1080/07350015.1990.10509766
139. Odum E. *Ecology* / Per. from English V.V. Alpatova. Moscow, Education, 1968; 168. (rus.).
140. Titenberg T. *Environmental Economics and Environmental Protection*. Moscow, Olma-Pess, 2001; 467. (rus.).
141. Buts U. *Theory and methods of resource saving management in agricultural production*. Saarbrecken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016; 201.
142. Danilovich P.A. Energy saving, alternative sources of energy. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018; 9(3):405-412.
143. Lähde E., Di Marino M. Multidisciplinary collaboration and understanding of green infrastructure Results from the cities of Tampere, Vantaa and Jyväskylä.

- kylä (Finland). *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 40:63-72. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.03.012
144. Nickel W. *Recycling-Handbuch: Strategien — Technologien — Produkte*. Düsseldorf, VDI Verlag, 1996; 526.
145. Bani M.S., Rashid Z.A., Hamid K.H.K. The Development of Decision Support System for Waste Management: a Review. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009; 25:161-168.
146. Antrekowitsch J., Steinlechner S. The recycling of heavy-metal-containing wastes: mass balances and economical estimations. *JOM*. 2011; 63(1):68-72. DOI: 10.1007/s11837-011-0017-2
147. Bedrunka K., K. Malik K. Sustainable development as a contemporary concept and strategy of regional development. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*. 2014; 339:11-22. DOI: 10.15611/pn.2014.339.01
148. Bribian I., Ferreira G., Uson A., Vasquez D. Study of the environmental performance of end-of-life tyre recycling through a simplified mathematical approach. *Thermal Science*. 2012; 16(3):889-899. DOI: 10.2298/tsci120212129a
149. Ostertag K., Brandstetter P., Albrecht S., Fröhling M., Schultmann F., Trippe F. *Ressourceneffizienz potenzieren: Der Beitrag des BMBF-Förderschwerpunktes, in Recycling und Rohstoffe Band 5*, Hrsg: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2012; 34.
150. Rao S.R. *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*. Oxford, UK, 2006; 558.
151. Tennant-Wood R. Going for zero: A comparative critical analysis of zero waste events in southern New South Wales. *Australasian Journal of Environmental Management*. 2003; 10(1):46-55. DOI: 10.1080/14486563.2003.10648572
152. Makovetska Yu.M. Secondary Resource Correction in Ukraine and the Regional Aspects of the First Establishment. *Regional Economy*. 2011; 3:172-180. (rus.).
153. Melnik L.G. *Ecological economy*. Sumy, University book, 2001; 350. (rus.).
154. Polovnikova S.Yu. *Resource-saving in the widespread transformation of the economy of Ukraine : Abstract of thesis ... cand. econ. Sciences*. Dnepropetrovsk, DDAU, 2003; 20. (rus.).
155. Tshangela M. Environmental technology assessment for enhanced green economy transition in South Africa. *International Journal of African Renaissance Studies*. 2014; 9(2):213-226. DOI: 10.1080/18186874.2014.987964
156. Steiner A. Focusing on the good or the bad: what can international environmental law do to accelerate the transition towards a green economy? *American University International Law Review*. 2010; 25(5):843975.
157. Pretty J. The Consumption of a Finite Planet: Well-Being, Convergence, Divergence and the Nascent Green Economy. *Environmental and Resource Economics*. 2013; 55(4):475-499. DOI: 10.1007/s10640-013-9680-9
158. Wysokińska Z. Transition to a Green Economy in the Context of Selected European and Global Requirements for Sustainable Development. *Comparative Economic Research*. 2013; 16(4):203-226. DOI: 10.2478/cer-2013-0034
159. Hamdouch A., Depret M. Sustainable development policies and the geographical landscape of the green economy; actors, scales and strategies. *Finisterra*. 2013; 47(94):49-80. DOI: 10.18055/finis2681
160. Kurpayanidi K. Innovation component of the business environment as a factor enhancing economic growth. *Economics*. 2014; 1(2):6-9.
161. Ehresman T., Okereke C. Environmental justice and conceptions of the green economy. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. 2015; 15(1):13-27. DOI: 10.1007/s10784-014-9265-2
162. Borel-Saladin J.M., Turok I.N. The Green Economy: Incremental Change or Transformation? *Environmental Policy and Governance*. 2013; 23(4):209-220. DOI: 10.1002/eet.1614
163. Chernykhivska A. Modern perspectives of development of “green” economy. *Economic Processes Management*. 2015; 1:108-115.
164. Dumitru Raluca-Ana-Maria. Green economy — risks and challenges of sustainable development. *Internal Auditing & Risk Management*. 2013; 8(1):38-52.
165. Ulitsky V.A., Vasilvitsky A.E., Plushchevsky M.B. *Industrial waste and resource conservation. Domestic and foreign experience of legislative and regulatory support* / ed. HELL. Kozlova and T.V. Borava. Moscow, SASHKO, 2006; 368. (rus.).
166. Bayanduryan G.L., Lushnikov R.L. Instruments for regulating resource conservation: positive and negative aspects. *Services: innovation and quality*. 2012; 3. URL: http://journal.kfrgteu.ru/files/1/2011_3_3.pdf (rus.).
167. Fedorova N.V., Mokhov V.A., Babushkin A.Yu. Analysis of foreign experience in the use of ash and slag waste from TPPs and the capabilities of multi-agent modeling of recycling processes (review). *Ecology of Industrial Production*. 2015; 3(91):2-7. (rus.).
168. Vishnya B., Domanskaya A. et al. Prospects of granular high calcium ash utilisation in the manufacture of building materials. *13-th International Baustofftagung Ibasil. Weimar*. 1997; 375-379.
169. Gorina A.P., Makhaeva N.V. Studying the foreign experience of resource saving in the housing and communal services within the framework of the course resource saving utilities “Enterprise Economics”. *Education Integration*. 2015; 3:191-199. (rus.).

170. Astafyev A. Energy Saving in the Housing Sector. Problems, the search for solutions. *Building Materials*. 2014; 50:11. (rus.).
171. Krygina A.M., Gusakova E.A. The development of regional housing construction on the basis of modeling and optimization of organizational and technical solutions in the field of greening and resource conservation. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 9:56-58. (rus.).
172. Vysotsky V.I., Vysotskaya I.F. Energy conservation and energy efficiency of housing and communal services — an integral part of the process of environmental safety. *Emergencies: Industrial and Environmental Safety*. 2016; 2-3(2627):105-108. (rus.).
173. Tkachenko T.B., Belousova L.S. Resource-saving management in the construction complex in the aspect of greening the economy. *Scientific Statements of BelSU*. 2012; 19-1(138):17-20. (rus.).
174. Prokhotsky Yu.M., Lunev G.G. *Organizational and economic problems of the use of secondary building resources in the reconstruction of real estate. Innovation and expertise*. Moscow, FGU NII RINK-TSE, 2010; 1(4):195. (rus.).
175. Zvyagina A.I. Secondary raw materials and technologies for their use for the production of building materials. *Technology of Mechanical Engineering*. 2007; 4:50-51. (rus.).
176. Snoonian D. How green buildings are smarter and safer energy-saving technology can have unexpected side benefits for building safety and intelligence. one case study shows us how. *Architectural Record*. 2003; 191(2):100-101.
177. Crawford R. *Life cycle assessment in the built environment*. Spon Press, New York, 2011; 272.
178. Goldstein B., Rasmussen F. LCA of Buildings and the Built Environment. *Life Cycle Assessment*. 2018; 695-722. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3_28
179. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J.-O. The importance of life-cycle based planning in maintenance and energy renovation of multifamily buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 44:715-725. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.033
180. Koen Steemers. *Integrated Building Design / Environmental Design of Urban Buildings. An Integrated Approach* / Edited by Mat Santamouris. Earthscan. London, 2006; 310-318.
181. Uvarova S.S., Snurnitsyn A.N., Perov R.V. Systematization of the criteria for the effectiveness of the “Green” construction. *Scientific Herald of the Voronezh GASU*. 2015; 2(13):79-82. (rus.).
182. Zaguskin N.N. “Green” construction — the main direction of transformational changes in the investment and construction sector. *Problems of the Modern Economy*. 2013; 4(48):315-319. (rus.).

Received August 15, 2019.

Adopted in a revised form on September 16, 2019.

Approved for publication December 28, 2019.

BIONOTES: **Eduard S. Tshovrebov** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor; **Research Institute Center for Environmental Industrial Policy (EIPC)**; 42 Olympic avenue, Mytishchi, 141006, Russian Federation; ID RISC: 470064; rebrovstanislav@rambler.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).

ми), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель 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.

