

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 9/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 9
2021**

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

Сквозной номер 154

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 9
2021**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	27.09.2021.
Подписан в свет	30.09.2021.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,10. Тираж 100 экз. Заказ № 244

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

Елена Анатольевна Король, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. жилищно-коммунального комплекса, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*

Дизайн и верстка: *Алина Германовна Алейникова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	27.09.2021.

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

М.А. Слепнев, А.А. Рязанцева

Обеспечение устойчивого развития городского парка-усадьбы «Останкино» г. Москвы 1115

М.А. Перекопская, Ю.В. Алексеев

Планирование поселений в лесопромышленных районах (на примере Архангельской области) 1124

Ю.Г. Страшнова, Л.Ф. Страшнова

**Пути совершенствования функционально-пространственной организации
социальной инфраструктуры Москвы. 1136**

Н.Г. Юшкова, Ю.В. Алексеев

**Локальные изменения региональных систем расселения:
условия возникновения, особенности, тенденции 1152**

Н.А. Самойлова

**Международный стандарт оценки воздействия на среду жизнедеятельности
BREEAM Communities (градостроительство) в России 1168**

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

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий

**Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов,
армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно 1182**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Н. Полилов, Н.А. Татусь

**Принципы совершенствования структуры композитных изделий,
основанные на изучении биотехнологий и биоматериалов 1191**

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Н.И. Шестаков, К.Л. Чертес, О.В. Тупицина, В.Н. Пыстин

Экологические особенности обращения с объектами дорожно-строительного комплекса. 1217

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.В. Ильинич, А.В. Перминов, А.А. Наумова

**Оценка влияния климатических характеристик и ландшафтных изменений
на максимальный сток малых водосборов 1228**

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю.А. Рыльцева

Современные способы и средства диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов. 1236

Требования к оформлению научной статьи 1264

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

<i>Mihail A. Slepnev, Anna A. Ryazantseva</i> Ensuring the sustainable development of the city park-estate “Ostankino” in Moscow	1115
<i>Marina A. Perekopskaia, Yuri V. Alekseev</i> Planning of settlements in timber-producing areas (on the example of the Arkhangelsk region)	1124
<i>Yulia G. Strashnova, Lyudmila F. Strashnova</i> Ways to improve the functional and spatial organization of Moscow’s social infrastructure	1136
<i>Natalia G. Yushkova, Yuri V. Alekseev</i> Local changes in regional settlement systems: conditions, features, trends	1152
<i>Nadezhda A. Samoylova</i> Urban planning in Russia and international standard for assessing the impact on the environment of BREEAM Communities	1168

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

<i>Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Aleksandr S. Akuleckij</i> Stress-strain state of weak and filled soils reinforced with reinforced concrete and soil piles, respectively	1182
---	------

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

<i>Alexander N. Polilov, Nikolay A. Tatus’</i> Experience nature as a basis for building strong composite structures.	1191
---	------

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

<i>Nikolay I. Shestakov, Konstantin L. Chertes, Olga V. Tupicyna, Vitaliy N. Pystin</i> Ecological features of handling objects of the road construction complex	1217
--	------

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

<i>Vitaly V. Ilinich, Aleksey V. Perminov, Anna A. Naumova</i> Assessment of the impact of climatic characteristics and landscape changes on the maximum flow of small watersheds.	1228
--	------

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

<i>Yuliya A. Ryltseva</i> The modern methods and means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines	1236
Requirements for research paper design	1264

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).

Обеспечение устойчивого развития городского парка-усадьбы «Останкино» г. Москвы

М.А. Слепнев, А.А. Рязанцева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние рекреационной нагрузки на природно-антропогенный территориальный комплекс (ПАТК) парк-усадьба «Останкино» в Северо-Восточном административном районе г. Москвы. В целях обеспечения устойчивого развития природных комплексов особую значимость имеет способность компонентов природной среды к самовосстановлению в условиях антропогенного воздействия. С учетом увеличения жилых и производственных территорий, расположенных в непосредственной близости к зонам рекреаций, увеличивается антропогенное воздействие на природные комплексы. Прежде всего, это сказывается на рекреационных территориях парковых зон, где рекреационная нагрузка начинает превышать нормируемую и оказывает негативное воздействие на территорию, вызывая нарушения городской экосистемы в целом. Практический аспект научных исследований включает результаты анализа влияния антропогенной нагрузки на ПАТК «Останкино».

Материалы и методы. Использованы атрибутивная информация из открытых источников и по результатам проведения полевых работ, правовые документы, картографические материалы. Применен системный подход. Расчет потенциальных посетителей проводился методом простого подсчета с помощью Microsoft Office Excel для составления зависимостей посещения от времени. Подсчет количества посетителей, проход которых осуществлялся через организованные входы, выполнен в будние и выходные дни с 10.00 до 21.00 часов. Неорганизованные входы в подсчете не учитывались.

Результаты. Выявлено превышение нормативного значения рекреационной нагрузки территории парка-усадьбы «Останкино» г. Москвы и построены графики зависимости посещения от временных интервалов.

Выводы. Увеличенный темп притока населения и экологического загрязнения приводит к трансформации экологического каркаса города. В дальнейшем планируется рассмотреть и описать предложения по разработке градостроительных регламентов, направленных на организацию и развитие рекреационных пространств как самой территории ПАТК, так и жилых зон, находящихся в непосредственной близости от границ комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антропогенная нагрузка, функциональная трансформация, природный каркас города, рекреационная территория, устойчивое развитие территории, экологическая емкость, рекреационная нагрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слепнев М.А., Рязанцева А.А. Обеспечение устойчивого развития городского парка-усадьбы «Останкино» г. Москвы // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1115–1123. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1115-1123

Ensuring the sustainable development of the city park-estate “Ostankino” in Moscow

Mihail A. Slepnev, Anna A. Ryazantseva

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

ABSTRACT

Introduction. Providing the natural frame of the city as a sustainable system of landscaping and water areas in the urban environment is one of the tasks aimed at preserving the natural frame of the urban environment. The article focuses on the influence of the recreational load on the natural-anthropogenic territorial complex (PATC) located in the North-Eastern administrative region of Moscow. To ensure sustainable development of natural areas, the ability of the components of the natural environment to self-heal under conditions of anthropogenic impact is of particular importance. Taking into account the increase in residential and industrial areas located in close proximity to natural zones, the anthropogenic impact on natural complexes is increasing. First of all, this affects the recreational areas of park zones, where the potential recreational load begins to exceed the standardized and causes degradation of green spaces and disruption of the urban ecosystem. Recreational load affects the state of the natural complex of the city, and its value is determined by the planning structure of urban development. While ensuring the safety of city parks, it becomes necessary to work with complete and reliable information, which can only be obtained through research. The practical aspect of scientific research, considered in the article, includes the results of the analysis of the impact of anthropogenic load on the natural-anthropogenic territorial complex of the park - the estate “Ostankino”.

Materials and methods. The paper uses various attributive information collected from open sources and based on the results of field work by the authors, legal documents, and various cartographic materials. The calculation of potential visitors was carried out by a simple calculation method, followed by the use of the Microsoft Office Excel software product to compile the time dependencies of the visit.

Results. On the basis of the conducted research, the excess of the normative value of the recreational load of the territory of the Ostankino estate park in Moscow was revealed and graphs of the dependence of the visit on the time intervals were constructed.

Conclusions. The increased rate of population inflow and environmental pollution leads to the transformation of the ecological framework of the city.

KEYWORDS: anthropogenic load, functional transformation, natural framework of the city, recreational area, sustainable development of the territory, ecological capacity, recreational load

FOR CITATION: Slepnev M.A., Ryazantseva A.A. Ensuring the sustainable development of the city park-estate "Ostankino" in Moscow. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1115-1123. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1115-1123 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время с увеличением уровня урбанизации наблюдается значительное развитие промышленных комплексов, транспортной инфраструктуры, строительство жилого фонда — все это напрямую влияет на природные городские территории [1, 2]. Природные городские территории формируют единый городской каркас благодаря взаимодействию различных элементов — «ядер» и «коридоров», связывающих между собой природные комплексы. Главные функции единого городского природного каркаса — развитие систем, направленных на изоляцию техногенных территорий; сохранение экосистем и биоценозов; улучшение экологической обстановки в городе и комфорт жителей [3–5].

Сейчас появилась необходимость внесения изменений в градостроительную документацию, ориентированную на обеспечение сохранения городских рекреационных пространств с позиции устойчивого развития территории.

Рост численности населения, проживающего в зоне доступности границ природно-антропогенного территориального комплекса (ПАТК), и расширение системного подхода по застройке жилых территорий ведут к увеличению антропогенной нагрузки, изменениям и деградации ПАТК [6]. Данная проблема актуальна и требует особого внимания, так как природный каркас является отраслью экологической инфраструктуры территории населенных мест [7, 8].

Сохранение природного каркаса мегаполиса — приоритетная задача, она отражена в федеральных, локальных нормативных правовых актах, таких как Градостроительный кодекс РФ, который регулирует отношения «в области градостроительного планирования, застройки, рационального природопользования; охраны окружающей природной среды в целях обеспечения благоприятных условий проживания населения» [9–13]. В Земельном кодексе РФ среди основных принципов обозначена охрана земли как «природного объекта, важнейшего компонента окружающей среды»; Водный кодекс РФ закрепляет охрану водных объектов, которые выражаются в основе качества жизнедеятельности граждан; требования по формированию зеленых зон зафиксированы в Лесном кодексе РФ. Также к нормативно-правовым актам, регулирующим градостроительную деятельность, необходимо отнести Федеральные законы № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», № 52-ФЗ

«О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях»; Постановление Правительства Москвы № 120 ПП «Об утверждении правил землепользования и застройки города Москвы»; СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89».

Цель работы — оценить устойчивое развитие ПАТК на основе расчетного значения рекреационной нагрузки, полученной при проведении экспериментального исследования.

Задачи — проведение градостроительного анализа территории ПАТК парка-усадьбы «Останкино», определение количества посетителей и расчетных значений рекреационных нагрузок.

При проведении анализа ПАТК парка-усадьбы «Останкино» в г. Москва были выявлены нарушения градостроительного законодательства и Федерального закона № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях» в части эксплуатации территории, что приводит к необходимости изучить показатель рекреационных нагрузок парка-усадьбы «Останкино», а также провести оценку возможных посещений рассматриваемой территории жителями районов, находящихся в транспортной доступности границ ПАТК [14–18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория парка-усадьбы «Останкино» является частью выставочно-паркового комплекса ВДНХ, расположенного на севере столицы в районе Останкино. Территория Останкинского парка считается ландшафтным памятником и входит в заповедную зону. По данным Росреестра кадастровый номер объекта 77:02:0018011:1017. Категория земель определена как земли населенных пунктов, разрешенное использование — для размещения скверов, парков, городских садов. Согласно документу установлены участки расположения культурно-просветительных объектов: объекты размещения помещений и технических устройств парков культуры и отдыха. Площадь территории в рассматриваемых границах составляет 68,4 га. С 2017 г. считается объектом культурного наследия.

На рис. 1 представлена карта территории парка-усадьбы «Останкино» в границах рассматриваемого окружения.

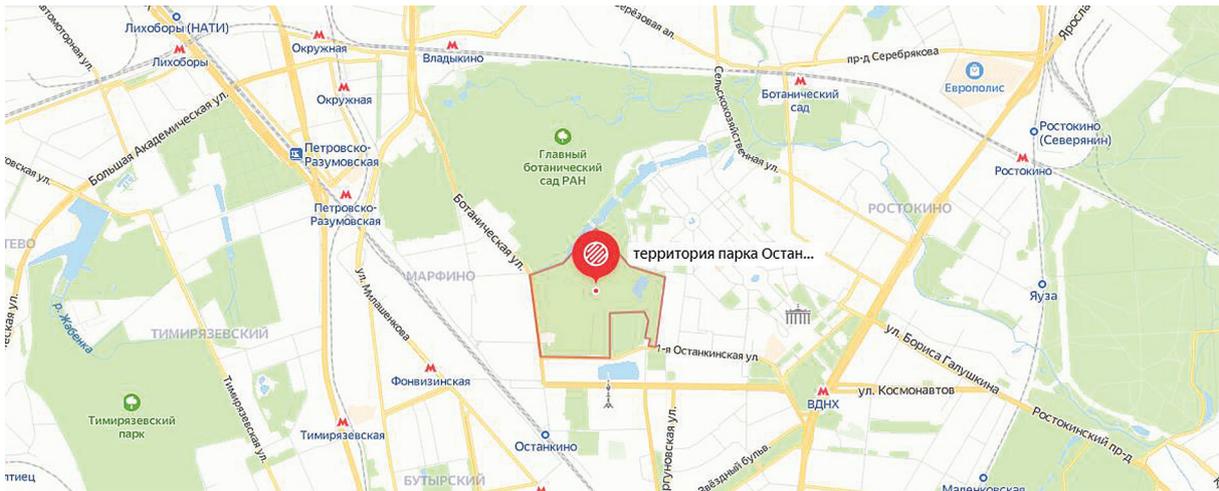


Рис. 1. Схема расположения территории парка «Останкино» в г. Москва

Fig. 1. Layout of the «Ostankino» Park territory in Moscow

В работе использованы атрибутивная информация из открытых источников; нормативно-правовые документы, регламентирующие деятельность ПАТК; картографические материалы; данные дистанционного зондирования (ДЗ), находящиеся в открытом доступе с применением картографического софта ArcGIS [19, 20]. Применен системный подход. Методика исследования включала три этапа: первый — сбор и анализ сведений, второй — обработка данных ДЗ и третий — географическая привязка. Расчет потенциальных посетителей проводился методом простого подсчета. Подсчет количества посетителей, проход которых осуществлялся через организованные входы, выполнен в будние и выходные дни с 10.00 до 21.00 часов. Неорганизованные входы в подсчете не учитывались. Для обработки полученных данных и составления графиков зависимости посещения использовался программный комплекс Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам анализа исторических документов открытых источников в сети интернет определе-

но, что местность, на которой расположен современный район Москвы Останкино и одноименный парк-усадьба, принадлежала Василию Яковлевичу Щелкалову, государственному деятелю времен Ивана Грозного. Согласно сохранившимся данным, приблизительно к концу XVI в. на территории парка были возведены деревянный барский дом и Церковь Живоначальной Троицы, а также вырыт и благоустроен пруд, а парковый комплекс стал богат сибирскими кедрами и дубами. Сохранившийся до наших дней усадебный дом принадлежал графу Николаю Шереметеву, которому усадьба досталась по наследству от матери, чья семья владела этой территорией на протяжении 120 лет.

В соответствии с планом 1766 г. (рис. 2) за усадьбой закреплена следующая планировка: дорога из Москвы проходила мимо плотины пруда, за которым располагались церковь и регулярный сад квадратной формы, пересеченный прямыми аллеями. За главной аллеей должен был располагаться графский «увеселительный» дом. С севера, запада и юга сад окружен лесом, а с востока к нему примыкают помещения для дворцовых служащих и ма-

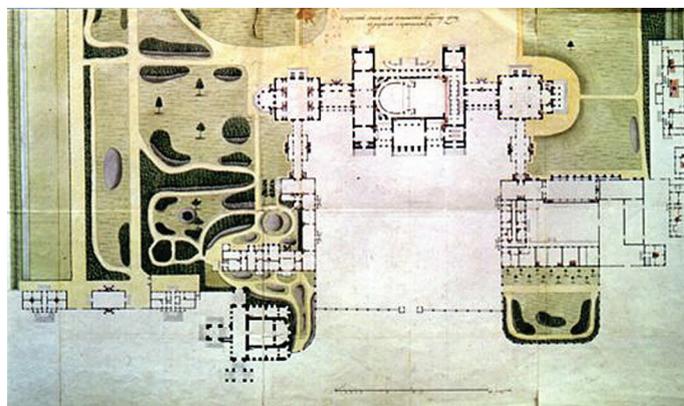


Рис. 2. План парка-усадьбы «Останкино»

Fig. 2. Plan park-estate «Ostankino»

стеровых. На территории усадьбы были разбиты теплицы, предназначенные для выращивания оливковых и фруктовых деревьев.

После 1917 г. парковая местность оказалась востребована под строительство индивидуального жилого сектора, а парк стал доступным для граждан. Спустя некоторое время территория парка подверглась новым градостроительным изменениям и стала называться Парк культуры и отдыха им. Ф. Дзержинского. Разработкой ПКиО им. Ф. Дзержинского занимались ведущие советские архитекторы, градостроители и мастера ландшафтной архитектуры Виталий Долганов и Юрий Гриневицкий. Парк был разделен на новые ландшафтные зоны с сохранением большинства старого лесного массива, открылись читальные веранды, павильоны и добавились новые скульптурные изображения (рис. 3).

В 1976 г. ПКиО им. Ф. Дзержинского стал неотъемлемой частью единого комплекса ВДНХ СССР, а через 15 лет данной территории было возвращено историческое название парк-усадьба «Останкино». В 2014 г. парк вновь открылся для посетителей с воспроизведенным историческим обликом, но с корректировками современного мегаполиса. Комплекс оснастили велодорожками, тренажерами, конной трассой, ввели в эксплуатацию лодочную станцию, устроили танцевальную площадку, украсили фонтанами Останкинский пруд. В парке разместился самый масштабный в европейской части страны скейт-парк под открытым небом (по состоянию на 2021 г. находится на реконструкции). Зимой на территории парка функционирует открытый ледовый каток. На рис. 4 приведено

существующее расположение объектов различного назначения.

По северной границе природного комплекса проходит территория Ботанического сада, с северо-восточной парк пересекает ВДНХ. После реконструкции 2014 г. предусмотренное ограждение территории было демонтировано, что привело к большому количеству несанкционированных посещений, а участок, расположенный по границе с ПАТК, превратился в парковочную зону мегаполиса.

Основным вкладом в научную область исследования является проведение расчета количества единовременных посетителей парка-усадьбы «Останкино» в г. Москва. Расчет количества граждан, посетивших природный комплекс, осуществлен с учетом посетителей, которые использовали три организованных центральных входа. Количество посетителей каждого из входов ПАТК «Останкино» определили с помощью метода простого подсчета и регистрации гостей. Неорганизованные входы не учитывались. Подсчет выполнялся утром с 10:00 до 13:00 ч, днем с 13:00 до 17:00 ч, вечером с 17:00 до 21:00 ч в будние и выходные дни. Рассматриваемая территория находится в границах красных линий улично-дорожной сети, представленных дорогами местного значения, прилегающими: со стороны Ботанической улицы (Вход 1), со стороны Дворцового (Останкинского) пруда (Вход 2) и со стороны Телецентра (Вход 3).

В табл. 1 представлены результаты подсчета общего количества посетителей в будние и выходные дни по интервалам времени.

Проанализировав результаты проектного эксперимента, выявлено, что максимальное количество



Рис. 3. Схематический план ПКиО им. Ф. Дзержинского, 1932 г.

Fig. 3. 1932, Schematic plan of the PKiO im. F. Dzerzhinsky

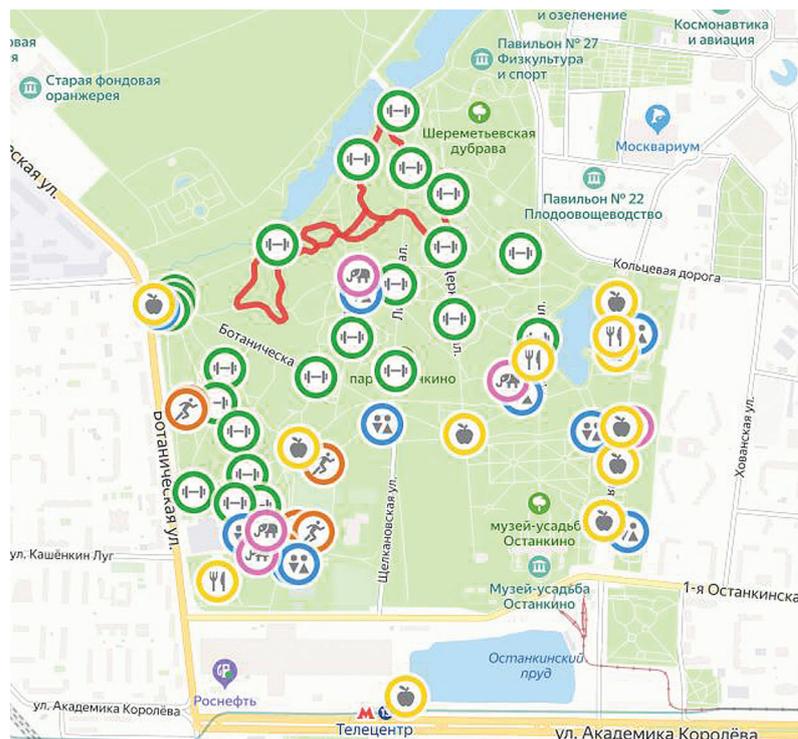


Рис. 4. Схема объектов на территории парка-усадьбы «Останкино»

Fig. 4. The layout of objects on the territory of the park-estate “Ostankino”

Табл. 1. Общее количество посетителей парка-усадьбы «Останкино». Центральные входы

Table 1. The total number of visitors to the park-estate “Ostankino”. Central entrances

Время Time	Дни недели, количество человек Days of the week, number of people					
	Понедельник Monday			Вторник Tuesday		
	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3
10:00–13:00	522	493	503	456	422	405
13:00–17:00	462	315	401	415	317	323
17:00–21:00	593	512	417	418	441	404
	Среда Wednesday			Четверг Thursday		
	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3
	10:00–13:00	435	381	329	442	399
13:00–17:00	386	377	366	385	361	311
17:00–21:00	398	375	401	397	367	324
	Пятница Friday			Суббота Saturday		
	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3	Вход 1 Gate 1	Вход 2 Gate 2	Вход 3 Gate 3
	10:00–13:00	459	427	448	578	563
13:00–17:00	426	431	411	642	619	635
17:00–21:00	483	456	462	714	682	711
	Воскресенье Sunday					
	Вход 1 Gate 1		Вход 2 Gate 2		Вход 3 Gate 3	
	10:00–13:00		543		551	
13:00–17:00		639		604		598
17:00–21:00		698		678		681

граждан, посещающих парк-усадьбу «Останкино», наблюдается в дневной час пик с 13:00 до 17:00, и в вечерние часы с 17:00 до 21:00. Полученные сведения были обработаны с помощью Microsoft Office Excel, и построен график зависимости количества посетителей парка-усадьбы «Останкино» от времени посещения с формированием атрибутивной информации (рис. 5) (рабочие дни недели).

На рис. 6 представлен график зависимости количества посетителей парка-усадьбы «Останкино» от времени посещения в выходные дни.

На основании расчетных данных осуществлен расчет рекреационной нагрузки на территорию пар-

ка-усадьбы «Останкино». Уровень рекреационной нагрузки, который отражает природно-ресурсный потенциал территории в зависимости от значений предельных антропогенных нагрузок, определен по формуле:

$$R = Ni/Si,$$

где R — уровень рекреационной нагрузки; Ni — количество посетителей объектов рекреации; Si — площадь рекреационной территории ПАТК.

Сводная информация по расчетному значению рекреационной нагрузки приведена в табл. 2.

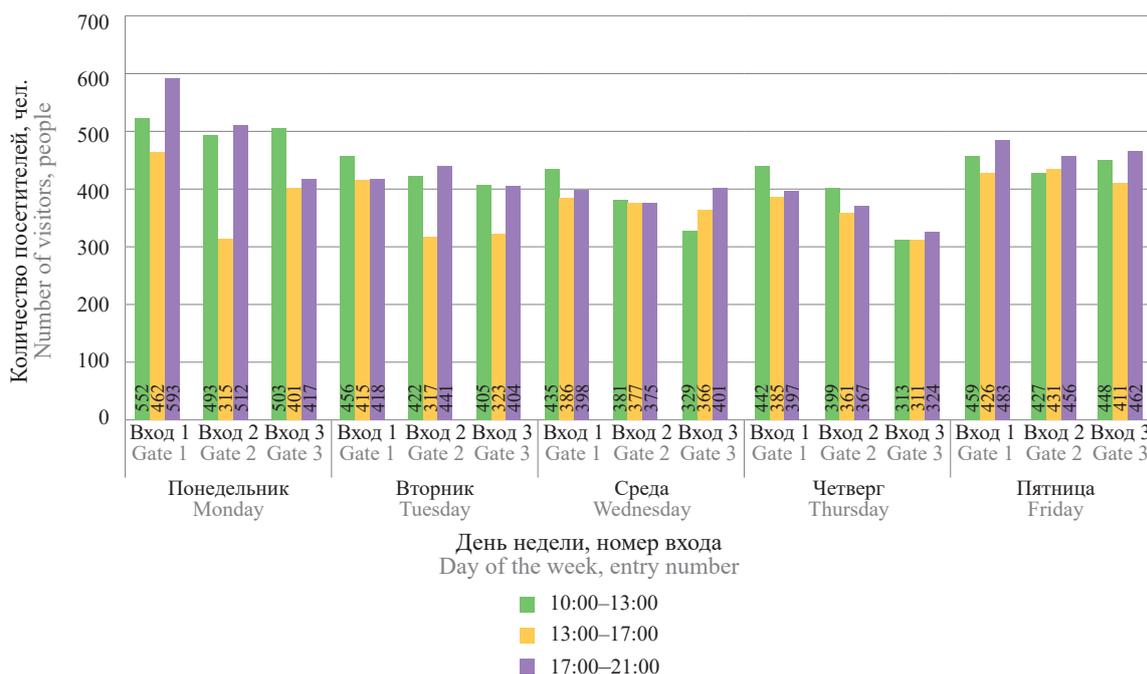


Рис. 5. График общего посещения парка-усадьбы «Останкино»

Fig. 5. Schedule of general visits to the park-estate “Ostankino”

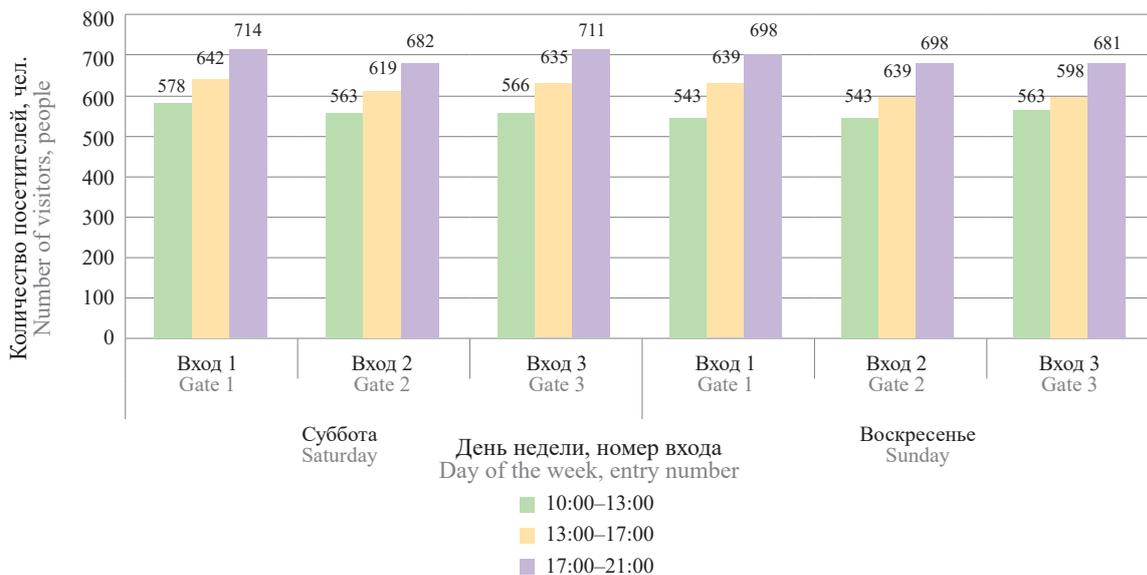


Рис. 6. График общего посещения парка-усадьбы «Останкино» в выходные дни

Fig. 6. Schedule of general visits to the park-estate “Ostankino” on weekends

Табл. 2. Расчетное значение рекреационной нагрузки

Table 2. The calculated value of the recreational load

Дни недели Days of the week	Количество посетителей, чел. Number of visitors, people	Площадь, га Area, ha	Расчетное значение рекреационной нагрузки Estimated value of recreational load
Понедельник Monday	4218	6,84	617
Вторник Tuesday	3601	6,84	527
Среда Wednesday	3448	6,84	504
Четверг Thursday	3299	6,84	482
Пятница Friday	4003	6,84	585
Суббота Saturday	5710	6,84	835
Воскресенье Sunday	5555	6,84	812

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время очевидно, что функциональная трансформация ПАТК, расположенных в городской черте, неизбежна, она приводит к изменению природного каркаса города и выполняет рекреационную функцию для жителей прилегающих жилых территорий. На основе проведенного анализа определена зависимость между антропогенной нагрузкой и сохранностью природного комплекса. Высокие темпы роста численности населения и уровня автомобилизации вызывают ухудшение качества городской среды и острую потребность в увеличении рекреационных ресурсов в городе.

Исследование было направлено на выявление влияния рекреационной нагрузки на территорию ПАТК «Останкино» и оценку рекреационной емкости парка для посетителей, проживающих в границах пешеходной доступности. Авторами установлено, что при развитии городской среды

вблизи объекта изучения увеличение антропогенной нагрузки на территорию ПАТК неминуемо, что в свою очередь повлечет за собой процесс деградации. В соответствии с СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» рассматриваемый ПАТК классифицируется как городской парк с нормативной рекреационной нагрузкой 100 чел./га. По результатам проведенного проектного эксперимента выявлено, что ПАТК «Останкино» испытывает рекреационные нагрузки, превышающие нормативное значение более чем в пять раз, что в значительной степени влияет на процесс экологического развития. В дальнейшей работе авторами для решения данной проблемы планируется рассмотреть и описать предложения по разработке градостроительных регламентов, направленных на организацию и развитие рекреационных пространств как самой территории ПАТК, так и жилых зон, находящихся в непосредственной близости от границ комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов. М. : Архитектура, 2010. 183 с.
2. Курбатова А.С. Ландшафтно-экологический анализ формирования градостроительных структур. М.; Смоленск : Манджента, 2004. 400 с.
3. Голуб А.А., Струкова Е.Б. Экономика природопользования. М. : Аспект-пресс, 2005. 345 с.
4. Кочуров Б.И., Ивашкина И.В. Урболандшафты Москвы и их пространственная трансформация // Экология урбанизированных территорий. 2015. № 2. С. 48–54.
5. Соколов Л.И., Щербина Е.В. Урбанистика и архитектура городской среды: учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Академия, 2014. 267 с.
6. Трутнев Э.К. О правовом градорегулировании // Управление развитием территорий. 2007. № 1.
7. Щербина Е.В. Развитие системы градостроительных регламентов для обеспечения устойчивого развития территорий // Евразийский союз ученых. 2015. № 5–6 (14). С. 166–168.
8. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационная практика в городах и доктрина градоустройства // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. № 3 (7). С. 3–18.
9. Ильина И.Н. Качество городской среды как фактор устойчивого развития муниципальных образований // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2015. № 5 (164). С. 69–82.

10. Щербина Е.В., Горбенкова Е.В. Современные подходы градостроительного проектирования сельских поселений и малых городов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 4 (24). С. 105–116.

11. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Вопросы комфортности и безопасности городской среды и их решение в рамках законодательных и нормативных документов // Строительство и реконструкция. 2021. № 2. С. 74–85. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-74-85

12. Papush P.P., Marshalkovich A.A. Ensuring the environmental safety of the territory in the process of construction and operation of water sports facilities // Ecology of Urban Areas. 2017. Vol. 1. Pp. 62–68.

13. Крашенинников А.В. Градостроительное развитие жилой застройки, исследование опыта западных стран: учебное пособие. М. : Архитектура, 2005. 112 с.

14. Егорова С.П., Кротова И.Э., Маршалкович А.С. Градостроительное регулирование территорий с учетом экологических факторов // Строительство: наука и образование. 2015. № 3. С. 1.

15. Правовое зонирование города. Введение в проблемы градорегулирования в рыночных ус-

ловиях / под ред. Э.К. Трутнева. 2-е изд., доп. М. : Фонд «Институт экономики города», 2002. 106 с.

16. Щербина Е.В., Данилина Н.В., Маршалкович А.С. Научно-методические основы построения модуля «Проектирование устойчивой городской среды» в процессе обучения бакалавров и магистров по направлению «Градостроительство» // Экология урбанизированных территорий. 2015. № 1. С. 70–74.

17. Тарасова Н.П., Беднова О.В., Кузнецов В.А. Система городских охраняемых природных территорий и устойчивое развитие мегаполиса // Экология урбанизированных территорий. 2011. № 3. С. 12–17.

18. Щербина Е.В., Белал А.А. Особенности атрибутирования объектов исторических территорий городов, разрушенных войной // Жилищное строительство. 2020. № 4–5. С. 12–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18

19. Щербина Е.В., Слепнев М.А. Экологическое картографирование при градостроительном проектировании природно-антропогенных территориальных комплексов // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 2. С. 92–97.

20. Sherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 22. Pp. 43131–43138.

Поступила в редакцию 19 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 6 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 6 сентября 2021 г.

Об авторах: **Михаил Алексеевич Слепнев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 710075; Scopus: 57194451734, ResearcherID: AAG-7322-2021, ORCID: 0000-0001-5375-9940; SlepnevMA@mgsu.ru;

Анна Александровна Рязанцева — специалист по учебно-методической работе; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1012288; RyazantsevaAA@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Krasnoshchekova N.S. *Formation of a natural frame in the General plans of cities*. Moscow, Architecture, 2010; 183. (rus.).

2. Kurbatova A.S. *Landscape-ecological analysis of the formation of urban structures*. Moscow; Smolensk, Manjenta, 2004; 400. (rus.).

3. Golub A.A., Strukova E.B. *Environmental Economics*. Moscow, Aspect-press, 2005; 345. (rus.).

4. Kochurov B.I., Ivashkina I.V. Cityscapes of Moscow and their spatial transformation. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 2:48-54. (rus.).

5. Sokolov L.I., Shcherbina E.V. *Urban studies and architecture of the urban environment: a textbook for university students*. Moscow, Academy, 2014; 267. (rus.).

6. Trutnev E.K. On legal urban regulation. *Management of the Development of Territories*. 2007; 1. (rus.).

7. Shcherbina E.V. Development of the system of urban planning regulations to ensure sustainable development of territories. *Eurasian Union of scientists*. 2015; 5-6(14):166-168. (rus.).

8. Ilyichev V.A., Yemelyanov S.G., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. The practice of innovations in cities and urban planning and development doctrine. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2014; 3(7):4-5. (rus.).

9. Ilyina I.N. Quality of urban environment as a factor of sustainable community development. *Property Relations in the Russian Federation*. 2015; 5(164):69-82. (rus.).

10. Shcherbina E., Gorbenkova E. Modern approaches of urban development design of rural settlements and small cities. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2018; 4(24):105-116. (rus.).
11. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Issues of comfort and safety of the urban environment and their solution within the framework of legislative and regulatory documents. *Building and Reconstruction*. 2021; (2):74-85. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-74-85 (rus.).
12. Papush P.P., Marshalkovich A.A. Ensuring the environmental safety of the territory in the process of construction and operation of water sports facilities. *Ecology of Urban Areas*. 2017; 1:62-68.
13. Krashennnikov A.V. *Urban development of residential buildings, study of the experience of Western countries: a tutorial*. Moscow, Architecture, 2005; 112. (rus.).
14. Egorova S.P., Krotova I.E., Marshalkovich A.S. Town-Planning Management of Urban Areas with Account for Ecological Factors. *Construction: Science and Education*. 2015; 3:1. (rus.).
15. *Legal zoning of the city. Introduction to the problems of urban regulation in market conditions / ed. E.K. Trutneva 2nd ed.* Moscow, Foundation “Institute for Urban Economics”, 2002; 106. (rus.).
16. Tscherbina E.V., Danilina N.V., Marshalkovich A.S. Scientifically-methodical bases of the building of the module “designing the sustainable town environment” in process of the education bachelor and master on direction “urban planning”. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 1:70-74. (rus.).
17. Tarasova N.P., Bednova O.V., Kuznetsov V.A. A system of urban conservation areas, and sustainable development of a megalopolis. *Ecology of Urban Areas*. 2011; 3:12-17. (rus.).
18. Shcherbina E.V., Belal A.A. Attribution features of sites in city’s historical territories destroyed by war. *Housing Construction*. 2020; 4-5:12-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18 (rus.).
19. Tsherbina E.V., Slepnyov M.A. Ecological mapping at urban design natural-anthropogenic territorial complexes. *Ecology of Urban Areas*. 2016; 2:92-97. (rus.).
20. Sherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(22):43131-43138.

Received May 19, 2021.

Adopted in revised form on September 6, 2021.

Approved for publication on September 6, 2021.

BIONOTES: **Mihail A. Slepnev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 710075; Scopus: Slepnev Mihail 57194451734, ResearcherID: AAG-7322-2021, ORCID: 0000-0001-5375-9940; SlepnevMA@mgsu.ru;

Anna A. Ryazantseva — specialist in educational and methodical work; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1012288; RyazantsevaAA@mgsu.ru.

Планирование поселений в лесопромышленных районах (на примере Архангельской области)

М.А. Перекопская, Ю.В. Алексеев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. На предприятиях отечественного лесопромышленного комплекса (ЛПК) перерабатывается только 20 % заготовленной древесины, остальная экспортируется в необработанном виде. Это обусловлено рядом причин, в том числе особенностями сложившейся территориально-пространственной организации производственных территорий и поселений, которая не соответствует изменившимся технологиям заготовки, транспортировки и переработки древесины, а также воспроизводства лесных ресурсов. В результате такого несоответствия и старых способов его объяснения осуществляется экстенсивное лесопользование, образуются значительные по площади нарушенные территории (т.е. обезлесенные в результате лесозаготовительной деятельности участки земель лесного фонда), постоянно смещаются границы лесозаготовительной деятельности, что приводит к удалению участков лесосырьевой базы от поселений, где расположены производственные территории предприятий ЛПК. Все это негативно влияет на функционирование данных предприятий и, как следствие, на жизнеспособность поселений, население которых участвует в процессах обработки и переработки древесины. Решению этих проблем может способствовать изменение подхода к территориально-пространственной организации поселений.

Материалы и методы. Используются общедоступные данные, опубликованные работы зарубежных и отечественных авторов. Применены метод системного анализа и методология территориально-пространственной организации поселений региона.

Результаты. Предложена классификация и идентификация взаимосвязанных поселений лесопромышленного района, исходя из их роли в планировочной организации района и реализации технологических процессов переработки древесины. Определены существующие производственные функции поселений и приведены возможные варианты их расширения. На примере Архангельской области подготовлена схема расширения производственных функций поселений. Рассмотрены мероприятия по приближению участков лесосырьевой базы лесоперерабатывающих предприятий к производственным территориям поселений, которые необходимо реализовывать при территориально-пространственной организации поселений.

Выводы. В сложившихся социально-экономических условиях необходима система планирования, которая делает возможным развитие ЛПК, обеспечивающее взаимосвязь процессов заготовки, последовательной безотходной переработки древесины и воспроизводства лесных ресурсов с территориально-пространственной организацией поселений лесопромышленного района.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Архангельская область, лесохозяйственные поселения, лесопромышленный район, планировочный ареал лесопромышленного комплекса, территориально-пространственное планирование, функции поселений, элементы планировочной структуры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Перекопская М.А., Алексеев Ю.В.* Планирование поселений в лесопромышленных районах (на примере Архангельской области) // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1124–1135. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1124-1135

Planning of settlements in timber-producing areas (on the example of the Arkhangelsk region)

Marina A. Perekopskaia, Yuri V. Alekseev

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

ABSTRACT

Introduction. The Arkhangelsk region is one of the largest domestic timber-processing regions with the most modern production complex. This region has a great raw material potential (the total wood stock is 2,573 million m³) and has a unique position for the export of target products. However, the existing potential in this timber industry area, as in other regions of Russia, is used irrationally. Only 20 % of the harvested wood is processed at the enterprises of the domestic timber industry complex (hereinafter — TIC), and the rest is exported in unprocessed form. The irrational use of resources is due to a number of reasons, including the peculiarities of the existing territorial and spatial organization of industrial territories and settlements, which does not correspond to the changed technologies of harvesting, transportation and processing of wood, as well as reproduction of forest resources. As a result of this discrepancy and the old ways of explaining it, extensive forest use is carried out, significant disturbed territories are formed, the boundaries of logging activities are constantly shifting, which leads to the removal of forest resource base sites from settlements where the production territories of TIC enterprises are located. All this negatively affects the functioning of these enterprises and, as a result, the viability of settlements whose population participates in the pro-

cesses of processing and processing of wood. A change in the approach to the territorial and spatial organization of settlements can contribute to solving these problems.

Materials and methods. The study was carried out on the basis of publicly available data, published works of foreign and domestic authors. During the research, the method of system analysis and the methodology of the territorial and spatial organization of settlements in the region were used.

Results. The classification and identification of interconnected settlements of the timber industry district is proposed, based on their role in the planning organization of the district and in the implementation of technological processes of wood processing. The existing production functions of settlements are defined and possible options for their expansion are proposed. On the example of the Arkhangelsk region, a scheme for expanding the production functions of settlements has been prepared. Measures have also been identified to bring the areas of the forest resource base of timber processing enterprises closer to the production territories of settlements, which must be implemented during the territorial and spatial organization of settlements.

Conclusions. In the current socio-economic conditions, there is a need for a planning system that makes it possible to develop a TIC that ensures the relationship of the processes of harvesting, consistent waste-free processing of wood and reproduction of forest resources with the territorial and spatial organization of settlements in the timber industry district.

KEYWORDS: Arkhangelsk region, forestry settlements, timber industry district, planning area of the timber industry complex, territorial and spatial planning, functions of settlements, elements of the planning structure

FOR CITATION: Perekopskaia M.A., Alekseev Y.V. Planning of settlements in timber-producing areas (on the example of the Arkhangelsk region). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1124-1135. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1124-1135 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы территориально-пространственной организации поселений с производственными территориями, обеспечения непрерывности производственной деятельности, комплексности переработки древесины, сохранения природного комплекса в лесопромышленных районах¹ всегда были объектом пристального внимания ученых.

Среди работ, посвященных этим проблемам, следует отметить труды В.В. Глотова², В.В. Владимирова³, М.Я. Вильнера [1], С.С. Морковиной [2], А.И. Писаренко [3], К.Л. Михайлова [4], И.В. Тонкого [5], В.Н. Лаженцева [6], Н.П. Кожемяко [7], Л.Я. Герцберг [8], Е. Nimni [9], L. Gamfeldt [10], T. Snäll [10] и др.

Несмотря на произошедшие технологические изменения в заготовке, переработке и воспроизводстве древесного сырья, сформулированные научные принципы лесопользования, разработанные методики планирования, размещения перерабатывающих комплексов, лесная промышленность остается добывающей отраслью. Это негативно влияет на функционирование предприятий лесопромышленного комплекса (далее — ЛПК) и жизнеспособность поселений лесопромышленного района [11, 12].

Для сохранения и дальнейшего развития системы поселений лесопромышленных районов требуется комплексное научно обоснованное решение, для которого необходима разработка метода

¹ Глотов В.В. Размещение лесопромышленного производства. М.: Лесная промышленность, 1977. 192 с.

² Владимиров В.В. Рациональное использование территории и охрана окружающей среды в районной планировке. М.: Знание, 1979. 32 с.

³ Владимиров В.В. Рациональное использование территории и охрана окружающей среды в районной планировке. М.: Знание, 1979. 32 с.

их территориально-пространственной организации и методики системного обоснования характеристик их производственных территорий во взаимосвязи с лесными ресурсами и технологическими процессами заготовки, транспортировки, переработки древесины и воспроизводства лесных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы картографические материалы, схемы территориального планирования Архангельской области, документы лесного планирования Архангельской области с характеристиками лесных ресурсов, официальные статистические данные.

Применена методология Ю.В. Алексеева территориально-пространственной организации поселений региона [13], включающая методы системного анализа, оценки взаимосвязи компонентов и типов среды жизнедеятельности людей.

Для детального исследования принят метод системного анализа компонентов и типов производственных территорий поселений и природного комплекса сухопутной среды биосферы земли, где сосредоточены лесные ресурсы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лесопромышленных районах формируется сложная система поселений, охватывающая обширные земли лесного фонда, в пределах которых осуществляется заготовка древесины.

Все поселения лесохозяйственного типа в лесопромышленном районе предложено подразделять на следующие виды:

1) поселения — центры заготовки древесины. Данные поселения организуются вблизи осваиваемых лесных участков для осуществления лесозаготовительной деятельности. Средняя численность населения: 1–2 тыс. чел.;

2) поселения — транспортные узлы. Формируются для обслуживания нижних лесных складов, на которые вывозится древесина с удаленных лесных участков по лесовозным дорогам для последующей ее перевалки и транспортировки по магистральной железной дороге либо автомобильной дороге к местам переработки. Средняя численность населения: 2–3 тыс. чел.;

3) поселения — центры лесопиления и деревообработки организуются в местах конечной доставки заготовленной древесины. Население таких поселений варьируется от 1 до 300 тыс. чел.;

4) поселения — центры переработки древесины создаются также в местах конечной доставки заготовленной древесины. Население — от 25 до 300 тыс. чел.

Исходя из последовательности технологических процессов по заготовке и переработке древесины произведено ранжирование лесохозяйственных поселений, и каждому виду присвоен ранг (рис. 1):

- 1-й ранг — поселения — центры переработки древесины;
- 2-й ранг — поселения — центры лесопиления и деревообработки;
- 3-й ранг — поселения — транспортные узлы;
- 4-й ранг — поселения — центры заготовки древесины.

Планировочными центрами территорий лесопромышленного района являются поселения 1-го ранга, в которых расположены лесоперерабатывающие комплексы, либо поселения 2-го ранга, где размещены предприятия лесопиления и дерево-

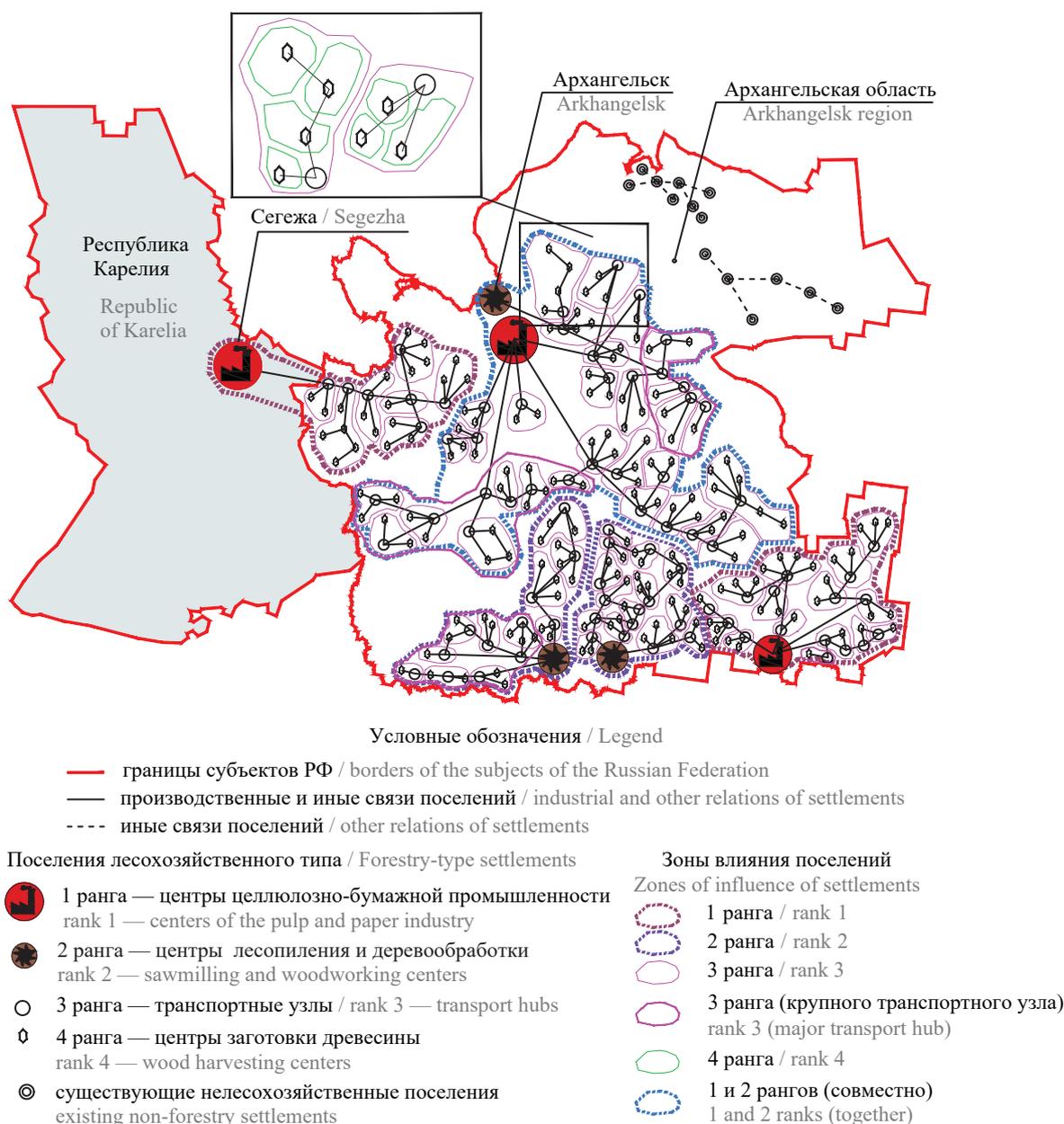


Рис. 1. Схема размещения поселений лесохозяйственного типа Архангельской области

Fig. 1. Layout of forestry-type settlements in the Arkhangelsk region

обработки. Поселения 4-го ранга служат первичным звеном технологической цепи по заготовке и переработке древесины. Поселения 3-го ранга (транспортные узлы) — связующее звено между поселениями 1-го и 2-го рангов и поселениями 4-го ранга.

На рис. 1 обозначены связи между лесохозяйственными поселениями и зоны влияния поселения каждого ранга. Зона влияния поселения 4-го ранга определена с учетом обслуживаемых населением данного поселения лесных участков. Зона влияния поселения 3-го ранга установлена с учетом зон поселений 4-го ранга, с которых поступает заготовленная древесина на лесоперевалочную базу данного поселения 3-го ранга.

В зону влияния поселений 1-го и 2-го рангов включены все поселения 3-го ранга, через которые доставляется на переработку и обработку соответственно заготовленная древесина с учетом зон влияния поселений 3-го ранга.

Для идентификации взаимосвязанных лесохозяйственных поселений лесопромышленного района введено понятие «планировочный ареал». Лесопромышленный район включает в себя планировочный ареал ЛПК (ПА₁), а также планировочный ареал лесных участков, планируемых к освоению (ПА₂) (табл.). Планировочный ареал ЛПК (ПА₁) включает:

- планировочные ареалы комплексной переработки древесины (ПА₃);
- планировочные ареалы лесоперерабатывающих комплексов (ПА₄);
- планировочные ареалы деревообрабатывающих комплексов (ПА₅).

Представленные виды и состав планировочных ареалов, а также выявленные взаимосвязи лесохозяйственных поселений 1–4 рангов (рис. 1) подтверждают необходимость их рассмотрения вне административных границ субъектов Российской Федерации.

Виды и состав планировочных ареалов

Types and composition of planning areas

Номер No.	Вид планировочного ареала Type of planning area	Состав Composition
1	Планировочный ареал лесопромышленного комплекса (ПА ₁) Planning area of the timber industry complex (PA ₁)	Совокупность лесохозяйственных поселений 1-го, 2-го, 3-го и 4-го рангов и осваиваемых лесозаготовителями лесных участков A set of forestry settlements of the 1st, 2nd, 3rd and 4th ranks and forest plots developed by loggers
2	Планировочный ареал лесных участков, планируемых к освоению (ПА ₂) Planning area of forest areas planned for development (PA ₂)	Совокупность лесных участков, планируемых к освоению A set of forest plots planned for development
3	Планировочный ареал комплексной переработки древесины (ПА ₃) Planning area of complex wood processing (PA ₃)	Совокупность взаимосвязанных лесохозяйственных поселений единой технологической цепи по заготовке и переработке древесины и осваиваемых лесных участков для снабжения сырьем предприятий ЛПК, расположенных в поселениях 1-го и 2-го рангов A set of interconnected forestry settlements of a single technological chain for the harvesting and processing of wood and developed forest areas for the supply of raw materials to the TIC enterprises located in the settlements of the 1st and 2nd ranks
4	Планировочный ареал лесоперерабатывающего комплекса (ПА ₄) Planning area of the timber processing complex (PA ₄)	Совокупность взаимосвязанных лесохозяйственных поселений 1-го, 3-го и 4-го рангов единой технологической цепи по заготовке и переработке древесины и осваиваемых лесных участков для снабжения сырьем предприятий ЛПК, расположенных в поселениях 1-го ранга A set of interconnected forestry settlements of the 1st, 3rd and 4th ranks of a single technological chain for the harvesting and processing of wood and developed forest areas for the supply of raw materials to the enterprises of the TIC located in the settlements of the 1st rank
5	Планировочный ареал деревообрабатывающего комплекса (ПА ₅) Planning area of the woodworking complex (PA ₅)	Совокупность лесохозяйственных поселений 2-го, 3-го и 4-го рангов единой технологической цепи по заготовке и переработке древесины и осваиваемых лесных участков для снабжения сырьем предприятий ЛПК, расположенных в поселениях 2-го ранга A set of forestry settlements of the 2nd, 3rd and 4th ranks of a single technological chain for the harvesting and processing of wood and developed forest areas for the supply of raw materials to the enterprises of the LPC located in the settlements of the 2nd rank

Так, планировочным центром группы лесохозяйственных поселений в северо-западной части Архангельской области является поселение 1-го ранга, расположенное в г. Сегеже Республики Карелия.

Границы планировочных ареалов, входящих в рассматриваемый лесопромышленный район, определены с учетом зон влияния поселений каждого ранга, обозначенных на рис. 1, и схематично отображены на рис. 2. Также на рис. 2 представлено взаиморасположение планировочных ареалов, входящих в лесопромышленный район.

Установление планировочных ареалов позволяет на основе модели структурной организации компонентов территориально-пространственных объектов, разработанной Ю.В. Алексеевым [13], выявить их особенности и специфику, а также сформировать предложения по территориально-пространственной организации лесохозяйственных поселений во взаимосвязи с лесными ресурсами.

В каждом из поселений 1–4 рангов реализуются определенные функции, исходя из их положения в иерархической структуре поселений лесопромышленного района.

Поселения осуществляют экономические, производственные, транспортные, административно-политические, культурные, научные, организационные и другие функции. Любая функция поселения имеет градообразующее значение. Чем многообразнее функции, реализуемые в поселении, тем выше его жизнеспособность.

Основные производственные функции, которые реализуются в поселениях 1–4 рангов, показаны на рис. 3. В поселении 4-го ранга выполняется производственная деятельность по заготовке древесины. В поселениях 1-го, 2-го и 3-го рангов, помимо производственных функций (деревообработка, лесопиление, переработка древесины), имеют место иные функции, в том числе социально-бытового обслуживания населения расположенных рядом поселений.

Для совершенствования территориально-пространственной организации поселений, обеспечения их жизнеспособности, необходимо расширение функций, реализуемых в лесохозяйственных поселениях 1–4 рангов (рис. 3).

При поиске сопутствующих функций установлено, что существующая организационная схема использования древесины в производстве предпола-

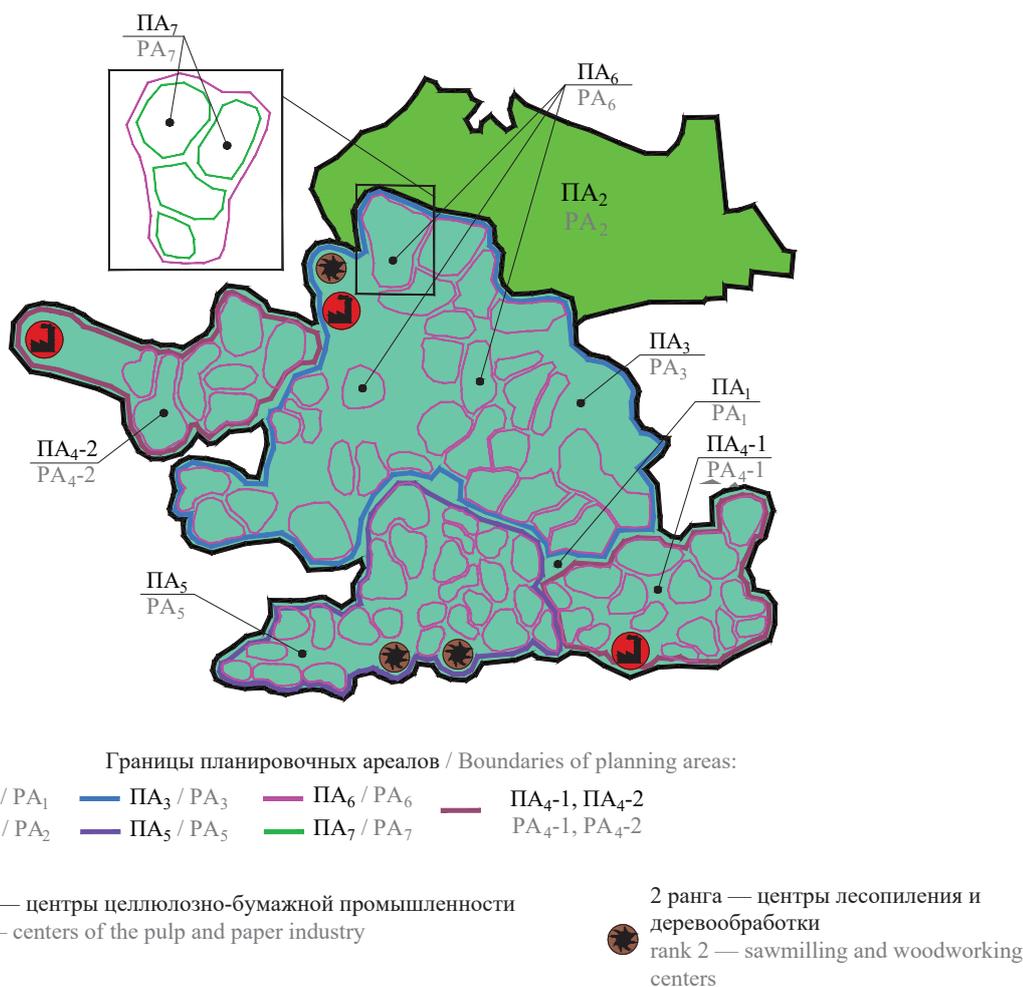


Рис. 2. Элементы планировочной структуры лесопромышленного района

Fig. 2. Elements of the planning structure of the timber industry district

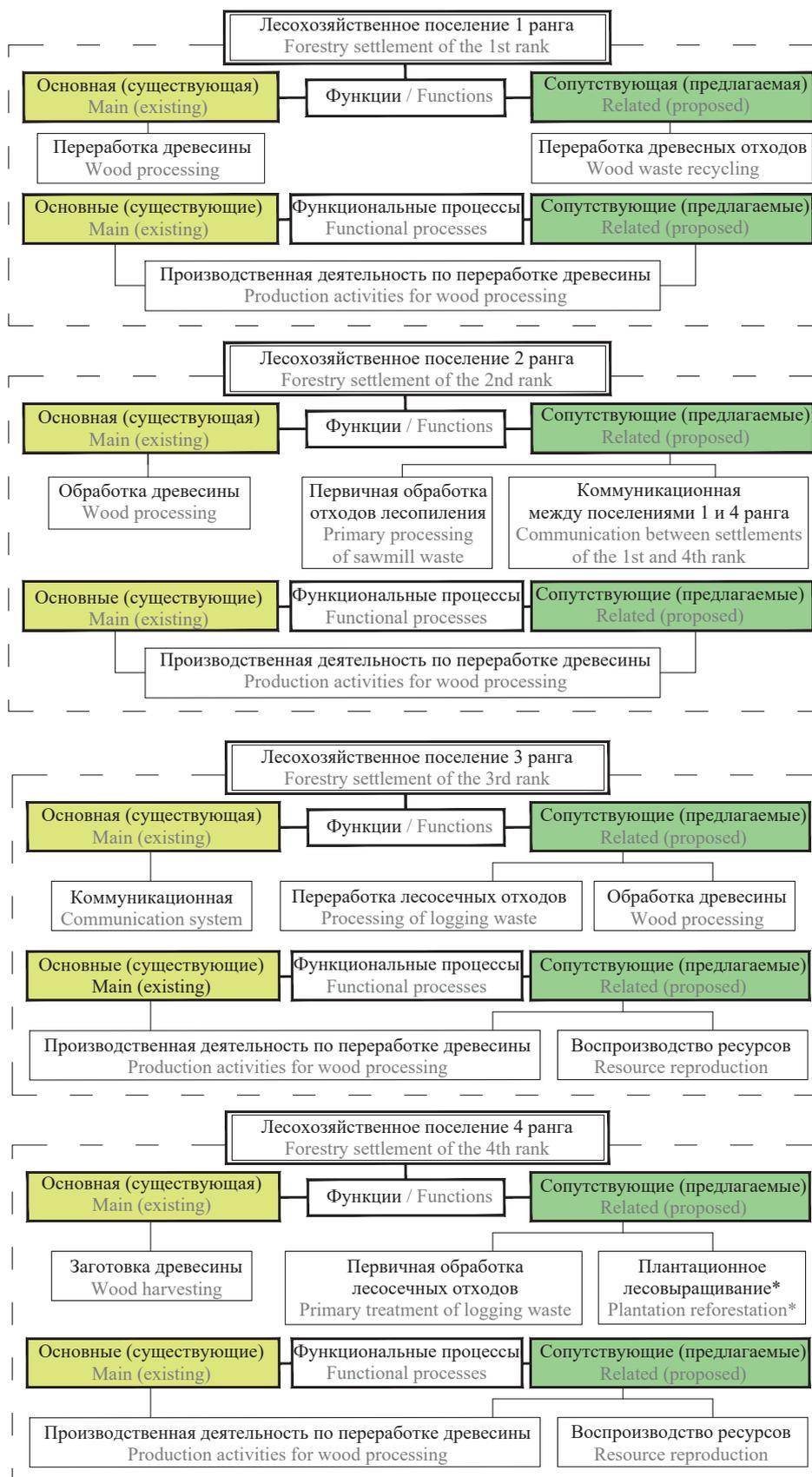


Рис. 3. Предложения по установлению сопутствующих функций для поселений 1–4 рангов: * — для территорий, пригодных для плантационного выращивания ресурсов

Fig. 3. Proposals for establishing associated functions for settlements of grades 1–4: * — for areas suitable for plantation cultivation of resources

гает образование вторичного сырья, которое не применяется на предприятиях ЛПК для получения целевых продуктов.

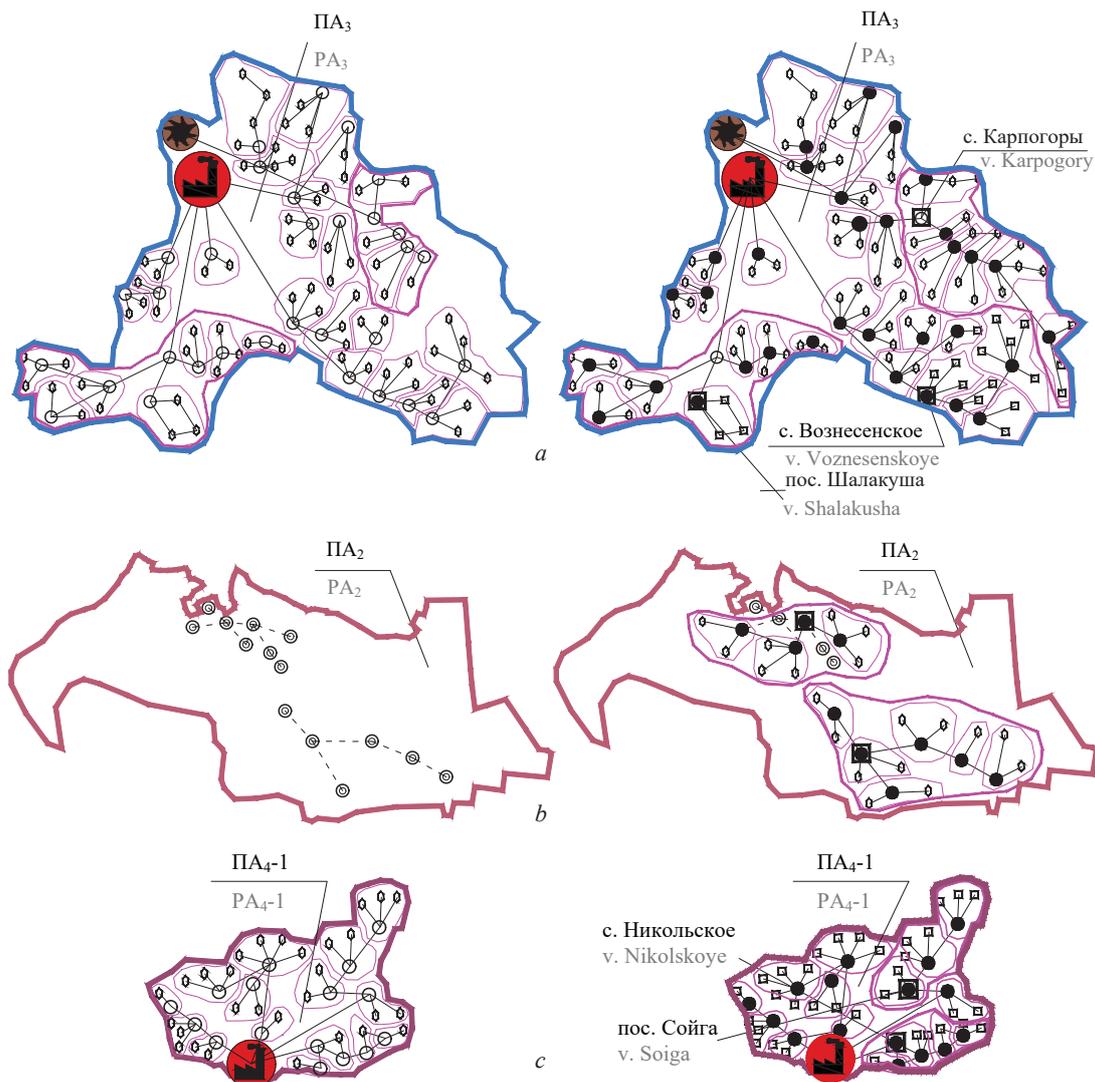
К вторичному сырью относятся: отходы лесозаготовок, лесопиления и деревообработки, целлюлозно-бумажного производства.

Вторичное сырье в Швеции, Финляндии и других странах с развитым ЛПК применяется для производства пеллет, биотоплива [14–20].

В целях вовлечения в использование вторичного сырья и обеспечения комплексности переработки

заготовленной древесины в отечественных лесопромышленных районах проанализирован технологический процесс заготовки, транспортировки и переработки древесины и предложены сопутствующие производственные функции по переработке этого сырья в поселениях 1–4 рангов (рис. 3). При определении сопутствующих функций поселений также учтена необходимость развития в России плантационного лесовыращивания.

На основании данных, представленных на рис. 3, и с учетом имеющихся особенностей планировочных



Условные обозначения / Legend

-  поселения 1 ранга — центры целлюлозно-бумажной промышленности
settlements of the 1st rank — centers of the pulp and paper industry
-  поселения 2 ранга — центры лесопиления и деревообработки
settlements of the 2nd rank — centers of sawmilling and woodworking
-  поселения 3 ранга — транспортные узлы
settlements of the 3rd rank — transport hubs
-  поселения 4 ранга — вахтовые поселки для заготовки древесины
settlements of the 4th rank — shift settlements for timber harvesting

Рис. 4. Схема преобразования производственных функций поселений 1–4 ранга планировочных ареалов: а — планировочный ареал ПА₃; б — ПА₂; в — ПА₄₋₁; д — ПА₄₋₂; е — ПА₃; индекс 1 — существующие типы и связи поселений; индекс 2 — предлагаемые типы и связи поселений

ареалов ПА₂, ПА₃, ПА₄-1, ПА₄-2, ПА₅ (рис. 1) подготовлены предложения по расширению числа производственных функций поселений 1–4 рангов лесопромышленного района.

В частности, поселения 4-го ранга и поселения 3-го ранга в планировочных ареалах ПА₃, ПА₄-1, ПА₄-2, ПА₅ (рис. 4) дополнены функциями первичной обработки лесосечных отходов и переработки лесосечных отходов соответственно.

В границах территории планировочных ареалов ПА₃, ПА₄-1, ПА₅, пригодной для плантационного вы-

ращивания лесных ресурсов (рис. 5)⁴, предусмотрен переход к интенсивному лесопользованию и непрерывной производственной деятельности предприятий ЛПК. Поселения 4-го ранга в данных планировочных ареалах дополнены функциями плантационного лесовыращивания (рис. 4).

В поселениях 3-го ранга (крупных транспортных узлах) планировочных ареалов ПА₃, ПА₄-1

⁴ Лесной план Архангельской области. URL: <https://dvinaland.ru>

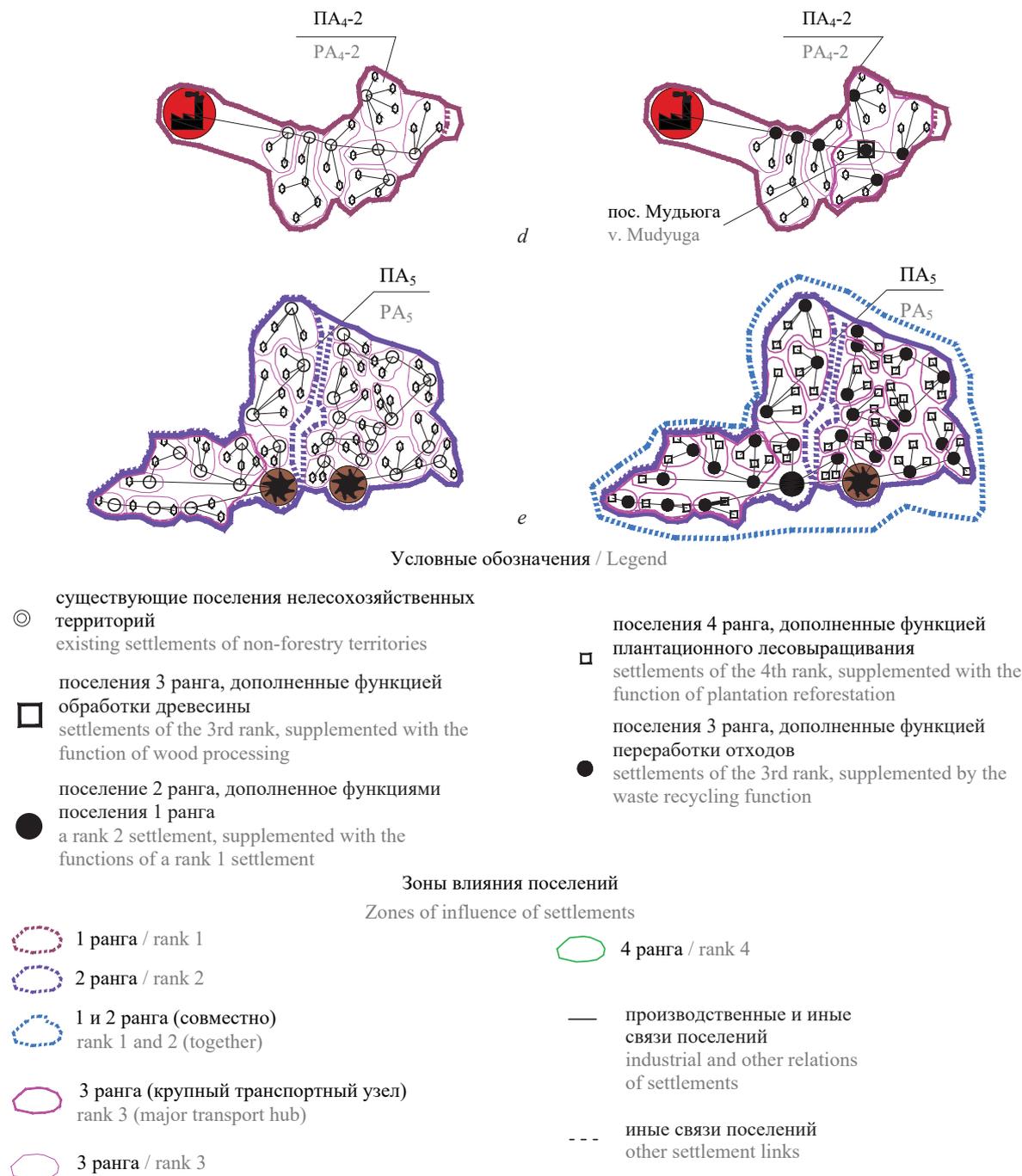


Fig. 4. Scheme of transformation of production functions of settlements of the 1st–4th rank of planning areas: a — planning area of PA₃; b — PA₂; c — PA₄-1; d — PA₄-2; e — PA₅; index 1 — existing types and connections of settlements; index 2 — proposed types and connections of settlements

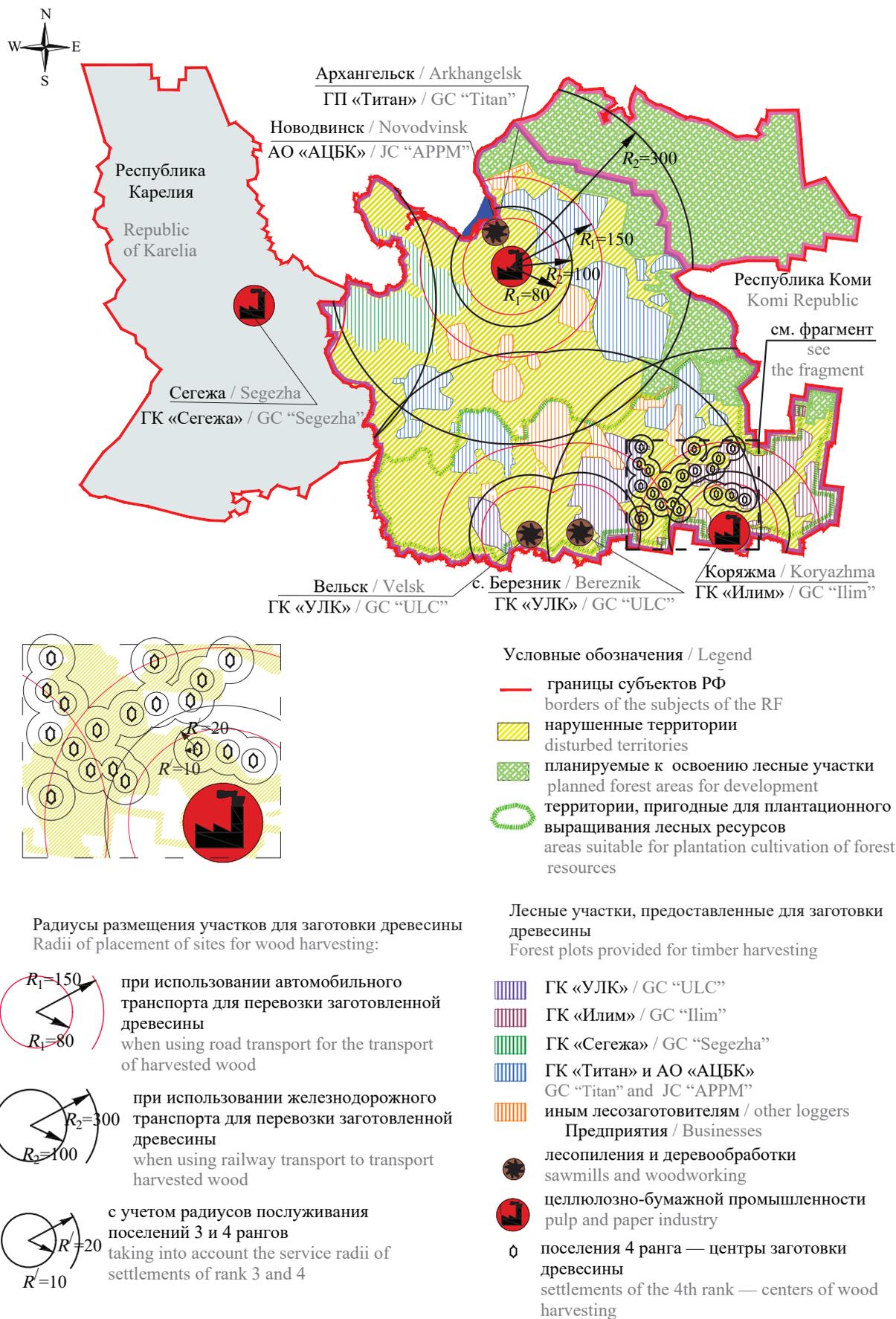


Рис. 5. Радиусы нормативного размещения участков сырьевых баз предприятий ЛПК
 Fig. 5. Radii of normative placement of sites of raw materials bases of enterprises of the TIC

и ПА₄-2 (с. Карпогоры, пос. Шалакуша, с. Вознесенское, пос. Сойга, с. Никольское и пос. Мудьюга) (рис. 4) предложено установление функций обработки древесины, что позволит сократить расстояния вывозки заготавливаемой древесины в негабаритной форме.

В планировочном ареале ПА₅ предлагается в одном из поселений 2-го ранга сформировать центр комплексной переработки древесины, дополнив его функциями поселения 1-го ранга.

Еще одним важным аспектом территориально-пространственной организации поселений лесопромышленного района является создание системы поселений 4-го ранга, ориентированных на воспроизводство лесных ресурсов и плантационное лесовыращивание, что позволит обеспечить непрерывность производственной деятельности по переработке древесины. При этом подлежат учету требования, предъявляемые предприятиями ЛПК к физическим свойствам лесных ресурсов, а также к их месторасположению и транспортной доступности.

При использовании автомобильного транспорта для перевозки заготовленной древесины (R_1 , км) расстояние вывозки должно составлять не более 80 км ($R_1 \leq 80$), но допускается увеличивать расстояния вывозки до 150 км, при использовании железнодорожного транспорта (R_2 , км) — не более 100 км ($R_2 \leq 100$), но допускается увеличивать расстояния вывозки до 300 км⁵.

Следует отметить, что лесные ресурсы, расположенные на удаленных и труднодоступных территориях, мало востребованы. В этой связи при планировании лесозаготовительной деятельности необходимо учитывать пространственное положение лесных ресурсов по отношению к производственным территориям лесохозяйственных поселений.

На основании официальных статистических данных и документов лесного планирования Архангельской области подготовлена схема расположения лесных участков, планируемых к освоению; лесных участков, предоставленных для лесозаготовительной деятельности; а также нарушенных территорий в границах лесопромышленного района по отношению к поселениям 1-го и 2-го рангов (рис. 5).

⁵ Ильин Б.А., Салминен Э.О. Теория лесотранспорта. СПб. : ЛТА, 1992. С. 28.

Учитывая, что значительная часть территорий рассматриваемого лесопромышленного района в границах нормативных расстояний вывоза древесины является нарушенной (рис. 5), именно эти территории подлежат исследованию в качестве приоритетных для воспроизводства лесных ресурсов и плантационного лесовыращивания.

Вовлечение в хозяйственное использование этих территорий позволит реализовывать мероприятия по приближению участков лесосырьевой базы лесоперерабатывающих предприятий к производственным территориям поселений, где расположены данные предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существующие подходы к территориально-пространственной организации поселений лесопромышленного района обуславливают их стагнацию.

Представлены предложения по совершенствованию территориально-пространственной организации поселений, которые заключаются в следующем:

В каждом из поселений лесопромышленного района реализуются определенные производственные функции, исходя из их роли в планировочной организации района и реализации технологических процессов переработки древесины. При планировании территориально-пространственной организации поселений лесопромышленного района необходимо выявлять данные функции и выявлять возможность установления дополнительных функций за каждым из них.

Совокупность территорий взаимосвязанных поселений представляет собой ограниченную пространственную часть лесопромышленного района, которую необходимо идентифицировать для ее планирования.

Важным аспектом территориально-пространственной организации поселений является выявление вблизи них территорий, пригодных для воспроизводства и плантационного лесовыращивания лесных ресурсов. Вовлечение данных территорий в хозяйственное использование позволяет обеспечить сбалансированность процессов освоения лесов и их воспроизводства, непрерывность функционирования существующих перерабатывающих производств, а также будет способствовать сохранению и развитию сложившихся поселений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильнер М.Я. Основы территориального планирования в Российской Федерации. М. : Спросэксперт, 2013. 184 с.
2. Морковина С.С., Торжков И.О. Инструменты и методы в системе стратегического управления предприятиями лесного комплекса : монография. Воронеж : ВГЛТУ, 2018. 97 с.
3. Писаренко А.И., Страхов В.В. О лесной политике России. М. : Юриспруденция, 2012. 599 с.
4. Михайлов К.Л., Гуцин В.А., Тараканов А.М. Организация сбора и переработки лесосечных отходов и дров на лесосеке // Лесной журнал. 2016. № 6 (354). С. 98–109. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.98

5. Тонкой И.В. Региональные системы расселения: тенденции формирования и предпосылки развития // *Academia. Архитектура и строительство*. 2012. № 4. С. 77–81.

6. Лаженцев В.Н. Север России: размещение производительных сил и пространственное развитие // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2011. № 1 (13). С. 37–46.

7. Кожемяко Н.П. Методический подход к обоснованию территориального размещения производственных мощностей лесопромышленного комплекса России // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 9 (56). С. 188–192.

8. Герцберг Л.Я., Будилова Е.В. Проблемы территориального планирования и качество среды проживания // *Народонаселение*. 2015. № 1 (67). С. 37–49.

9. Nimni E., Osipov A., Smith D. The challenge of non-territorial autonomy. Oxford, 2013. 255 p. DOI: 10.3726/978-3-0353-0511-1

10. Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P. et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. Issue 1. DOI: 10.1038/ncomms2328

11. Алексеев Ю.В., Перекопская М.А. Подход к оценке территорий с развитым лесопромышленным комплексом (на примере Архангельской области) // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 2. С. 62–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-62-71

12. *Perekopskaya M., Alekseev Y.* System of settlement of forest-industrial territories of the Arkhangelsk

region // *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction* 2020. 2021. Vol. 130.

13. Алексеев Ю.В., Сомов Г.Ю. Эволюция градостроительного планирования поселений : учебник. М. : Изд-во АСВ, 2014. 368 с.

14. Перекопская М.А., Алексеев Ю.В. Организация территорий с развитым лесопромышленным комплексом (на примере Швеции и России) // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 9. С. 1228–1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238

15. Fridman J., Holm S., Nilsson M., Nilsson P., Ringvall A., Ståhl G. Adapting National Forest Inventories to changing requirements — the case of the Swedish National Forest Inventory at the turn of the 20th century // *Silva Fennica*. 2014. Vol. 48. Issue 3. DOI: 10.14214/sf.1095

16. Jonsson R., Egnell G., Baudin A. Swedish forest sector outlook study. Geneva, 2011. 100 p. DOI: 10.13140/2.1.5194.1449

17. OECD territorial reviews : Skåne, Sweden. Paris : OECD, 2012. 293 p.

18. OECD territorial reviews: Japan 2016. Paris : OECD, 2016. 250 p.

19. OECD territorial reviews: the megaregion of Western Scandinavia. Paris : OECD, 2018. 258 p.

20. How to strengthen the territorial dimension of “Europe 2020” and the EU cohesion policy: background report based on the Territorial agenda 2020. Warsaw : Ministry of regional development, 2011. 128 p.

Поступила в редакцию 1 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 15 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Марина Алексеевна Перекопская** — аспирант кафедры градостроительства Института строительства и архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 960283; marpi25@yandex.ru;

Юрий Владимирович Алексеев — доктор архитектуры, профессор, профессор кафедры градостроительства Института строительства и архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 690296; alekseev-grado@yandex.ru.

REFERENCES

1. Vilner M.Ya. *Fundamentals of territorial planning in the Russian Federation*. Moscow, Srosexpert, 2013; 184. (rus.).

2. Morkovina S.S., Torzhkov I.O. *Tools and methods in the system of strategic management of enterprises of the forest complex: monograph*. Voronezh, VGLTU, 2018; 97. (rus.).

3. Pisarenko A.I., Strakhov V.V. *On the forest policy of Russia*. Moscow, Yurisprudentsiya, 2012; 599. (rus.).

4. Mikhaylov K.L., Gushchin V.A., Tarakanov A.M. Collection and processing of logging residual and firewood in a felling area. *Lesnoy Zhurnal*. 2016; 6(354):98–109. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.98 (rus.).

5. Tonkoy I.V. Regional systems of distribution of population: tendencies of formation and the prerequisite for development. *Academia. Architecture and construction*. 2012; 4:77–81. (rus.).

6. Lazhentzev V.N. The north of Russia: distribution of productive forces and space development. *Eco-*

nomic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast. 2011; 1:29-37. (rus.).

7. Kozhemyako N.P. Systematic approach to the substantiation of the territorial location of productive capacities of the Russian forestry complex. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011; 9(56):188-192. (rus.).

8. Gertsberg L.Y., Budilova E.V. Problems of territorial planning and quality of living environment. *Population*. 2015; 1:37-49. (rus.).

9. Nimni E., Osipov A., Smith D. *The challenge of non-territorial autonomy*. Oxford, 2013; 255. DOI: 10.3726/978-3-0353-0511-1

10. Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P. et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*. 2013; 4(1). DOI: 10.1038/ncomms2328

11. Alekseev Yu., Perekopskaya M. Approach to the assessment of territories with a developed forestry complex (on the example of the Arkhangelsk region). *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020; 2:62-71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-62-71 (rus.).

12. Perekopskaya M., Alekseev Y. System of settlement of forest-industrial territories of the Arkhangelsk region. *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. 2021; 130. (rus.).

13. Alekseev Yu.V., Somov G.Yu. *Evolution of urban planning of settlements : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2014; 368. (rus.).

14. Perekopskaya M.A., Alekseev Yu.V. Management of territories that accommodate advanced timber industry enterprises (as illustrated by Sweden and Russia). *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(9):1228-1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238 (rus.).

15. Fridman J., Holm S., Nilsson M., Nilsson P., Ringvall A., Ståhl G. Adapting National Forest Inventories to changing requirements — the case of the Swedish National Forest Inventory at the turn of the 20th century. *Silva Fennica*. 2014; 48(3). DOI: 10.14214/sf.1095

16. Jonsson R., Egnell G., Baudin A. *Swedish forest sector outlook study*. Geneva, 2011; 100. DOI: 10.13140/2.1.5194.1449

17. *OECD territorial reviews : Skåne, Sweden*. Paris, OECD, 2012; 293.

18. *OECD territorial reviews: Japan 2016*. Paris, OECD, 2016; 250.

19. *OECD territorial reviews: the megaregion of Western Scandinavia*. Paris, OECD, 2018; 258.

20. *How to strengthen the territorial dimension of "Europe 2020" and the EU cohesion policy: background report based on the Territorial agenda 2020*. Warsaw, Ministry of regional development, 2011; 128.

Received June 1, 2021.

Adopted in revised form on August 22, 2021.

Approved for publication on September 15, 2021.

BIONOTES: **Marina A. Perekopskaia** — postgraduate student of the Department of Urban Planning of the Institute of Civil Engineering and Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 960283; mappi25@yandex.ru;

Iurii V. Alekseev — Doctor of Architecture, Professor, Professor of the Department of Urban Planning of the Institute of Civil Engineering and Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690296; alekseev-grado@yandex.ru.

Пути совершенствования функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры Москвы

Ю.Г. Страшнова, Л.Ф. Страшнова

Государственное автономное учреждение «Научно-исследовательский и проектный институт
Генерального плана города Москвы» (ГАУ «Институт Генплана Москвы»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность совершенствования функционально-пространственной организации сферы обслуживания населения Москвы обусловлена изменяющимися в настоящее время образом и стилем жизни, поведенческими предпочтениями населения в части пользования объектами социальной инфраструктуры. Существующие функциональный состав и территориальная доступность объектов не соответствуют потребностям и перспективным запросам различных социально-демографических групп населения. Цель исследования — определение принципов организации системы культурно-бытового обслуживания, отвечающей вызовам современного этапа экономического, социально-демографического, технологического, градостроительного развития города.

Материалы и методы. Использованы данные официальной статистики и натурного обследования (сбор информации о территории, населении, сложившейся застройке, состоянии объектов), системного, типологического, функционально-структурного, статистического, сравнительного анализа, социологического опроса населения. Статистический анализ выполнен на основе сведений из официальных муниципальных и региональных источников (Росстат и Мосгорстат).

Результаты. Предложена усовершенствованная модель функционально-планировочной организации социальной инфраструктуры, предусматривающая развитие объектов обслуживания двух уровней — регионального и межрегионального, различающихся периодичностью посещений населения, функциональным составом объектов. Размещение объектов регионального уровня, согласно модели, предусмотрено в микрорайонах или планировочных районах; межрегионального уровня для обеспечения столичных функций — на специализированных территориях. С учетом сложившегося транспортного каркаса и рекомендованной пространственной организации социальной инфраструктуры в системе застроенных территорий приведена система общегородских центров следующих уровней: агломерационного, межрайонного, районного.

Выводы. Трансформация функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры в предложенном направлении создаст благоприятные условия для развития системы культурно-бытового обслуживания, обеспечивающей комфортность проживания, высокое качество городской среды, повышение качества человеческого капитала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: социальная инфраструктура, функциональный состав, функционально-пространственная организация, система городских общественных центров, многофункциональный общественный комплекс, поведенческие предпочтения населения, планировочный район

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Страшнова Ю.Г., Страшнова Л.Ф. Пути совершенствования функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры Москвы // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1136–1151. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1136-1151

Ways to improve the functional and spatial organization of Moscow's social infrastructure

Yulia G. Strashnova, Lyudmila F. Strashnova

State Autonomous Institution Research and Design Institute of the General Plan of the City of Moscow;
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The urgency of improving the spatial and functional organization of the service sector of the Moscow population is due to the currently changing way and lifestyle, behavioral preferences of the population regarding the use of social infrastructure facilities. The existing functional composition and territorial accessibility of objects do not correspond to the needs and prospective requests of various socio-demographic groups of the population. The purpose of the study is to determine the principles of organizing the system of cultural and consumer services that meet the challenges of the current stage of the economic, socio-demographic, technological, urban development of the city.

Materials and methods. The study used data from official statistics and field survey (collection of information about the territory, population, existing buildings, condition of objects), systemic, typological, functional and structural, statistical and comparative analysis.

Results. An improved model of the functional planning organization of social infrastructure is proposed, which provides

for the development of service facilities of two levels — regional and interregional, differing in the frequency of visits by the population, the functional composition of objects. The placement of objects of the regional level, according to the model, is provided in microdistricts or planning areas, at the interregional level to ensure the capital's functions — in specialized territories. Taking into account the existing transport framework and the recommended spatial organization of social infrastructure in the system of built-up areas a system of city-wide centers of the following levels is proposed: agglomeration, inter-district, district.

Conclusions. The transformation of the functional-spatial organization of social infrastructure in the proposed direction will create favorable conditions for the development of a system of cultural and consumer services, ensuring the comfort of living, high quality of the urban environment, improving the quality of human capital.

KEYWORDS: social infrastructure, functional composition, functional and spatial organization, system of public centers, multifunctional public complex, behavioral preferences of the population, planning area

FOR CITATION: Strashnova Y.G., Strashnova L.F. Ways to improve the functional and spatial organization of Moscow's social infrastructure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1136-1151. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1136-1151 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Цель развития социальной инфраструктуры города — обеспечение комфортных условий жизнедеятельности населения и повышение качества человеческого капитала [1]. В современных исследованиях социальная инфраструктура определяется как условие «сохранения человеческого потенциала, накопления человеческого капитала и воспроизводства регионального хозяйства», «улучшения качества жизни населения, повышения уровня его благосостояния и долголетия, формирования и воспроизводства здорового, творчески активного поколения» [2–4]. В настоящее время система культурно-бытового обслуживания находится на пороге глобальных перемен, обязанным реагировать на вызовы современного этапа экономического, социально-демографического, технологического, градостроительного развития города¹ [5].

Экономика мегаполисов характеризуется активной фазой информационного этапа развития: главным ресурсом становится человеческий капитал, доминирует роль творческого труда и информационных продуктов [6]. Здоровье населения, уровень его образования и квалификация являются одними из ведущих факторов экономического роста. Вкладывая в развитие объектов социальной инфраструктуры, благодаря которым население получает необходимые материальные и социальные блага, государство готовит фундамент для своего социально-экономического благополучия в будущем [7–9]. Первостепенная задача города — создание среды, отвечающей уникальным запросам свободной, творческой личности. Так, сейчас в мире популярна концепция развития «умных городов», ориентированных на человека, где «создание комфортных условий для жизни является одной из важнейших задач» [10–21].

Современные социально-демографические вызовы — увеличение продолжительности жизни, продление пенсионного возраста, рост социальной активности населения, персонализация потребно-

стей каждого человека. Формулой общественного потребления становится сочетание трех условий: быстро, удобно, разнообразно. Технологические процессы обеспечивают возможность удаленного доступа при помощи сети интернет к широкому перечню услуг в области культуры, образования, здравоохранения, розничной и оптовой торговли, общественного питания, бытового обслуживания, социальной защиты, банковских услуг, спорта и др. Градостроительные процессы характеризуются гиперурбанизацией городской среды, сокращением территориальных резервов, сохранением моноцентричности планировочной структуры города и его агломерации, тогда как современные тенденции развития российских городов и изменений в потребительской сфере позволяют рассматривать полицентрическую систему в качестве организационной модели общественного обслуживания [22].

Перечисленные условия не находят отражения в попытках осмысления путей переустройства социальной инфраструктуры, в изменении подходов к объективному учету потребностей современного человека, градостроительному и архитектурному проектированию в различных типах градостроительных ситуаций, разработке эффективных функционально-планировочных решений общественных центров и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследования функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры Москвы использованы данные натурного обследования территории и состояния объектов; опроса населения, проведенного Институтом Генерального плана Москвы в 2020 г. с целью определения удовлетворенности жителей развитием социальной инфраструктуры (опрошено порядка 4200 жителей 25 районов северо-западного сектора города). Результаты анализа использованы для оценки пространственной структуры и оптимальности размещения объектов, в частности для расчета показателей доступности социальной инфраструктуры от мест проживания, обеспеченности населения объектами обслуживания [23]. Статистический анализ выполнен на основе сведений из официальных

¹ Пространство города для человека. Исследование уровня и динамики градостроительного развития крупнейших мегаполисов мира. 2018. URL: <https://www.pwc.ru/ru/publications/city-space.html>

муниципальных и региональных источников (Росстат и Мосгорстат).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ развития сети объектов социальной инфраструктуры Москвы показал, что основной отраслевой проблемой является отсутствие взаимосвязи между ее функциональным составом и актуальными запросами населения, отражающими как локальные российские, так и устойчивые мировые тенденции. Сфера услуг приобретает качественно новые параметры, происходит функциональная и структурная перестройка прежних элементов сервиса, во многом обусловленная человеческим фактором¹ [9]. Требуемые детализации следующие моменты: отраслевая структура объектов культурно-бытового обслуживания характеризуется критически малой долей объектов социальной защиты, культуры, физической культуры и спорта. Их отставание препятствует реализации задач социальной политики РФ, декларирующей обязательность создания условий для духовного и физического развития детей и молодежи; комфортной жизни пожилых людей; восстановления социального статуса лиц, попавших в тяжелую жизненную ситуацию. Стагнация этого сектора социальной инфраструктуры выражается в недостаточном количестве существующих и планируемых объектов, в отсутствии необходимого спектра предоставляемых услуг, полноценных условий для общения молодежи, проведения развивающего культурного досуга, обмена профессиональными мнениями. В классическом виде такие услуги предоставляют молодежные культурные центры, включающие молодежные клубы, центры профессиональной подготовки и ориентации, театральные, художественные студии, технические мастерские и научные лаборатории, читальные залы, учреждения дополнительного образования и др. В настоящее время ограниченный набор услуг из приведенного перечня предоставляют антикафе, малочисленные спортивные залы, досуговые клубы, интеллектуальные центры. Данная ситуация увеличивает разобщение молодежи, понижает активность социальной жизни и личностного роста.

Кроме того, приоритетное направление социальной инфраструктуры для воспитания здорового поколения — это физическая культура и спорт. Потребность в регулярных занятиях формируется длительно, при условии наличия достаточного количества объектов и удобного их расположения. Перечисленные обстоятельства в настоящее время в Москве отсутствуют. Остро не хватает физкультурно-оздоровительных комплексов с бассейнами, катками и спортивными залами. При этом не снимает остроты проблемы широко развитая сеть коммерческих спортивных клубов и центров, расположенных на первых этажах жилых зданий и в общественных комплексах.

Серьезной проблемой остается несогласованность существующих приоритетов культурно-бытового обслуживания с российскими и мировыми социально-демографическими трендами. Устойчивая тенденция старения населения, обусловленная увеличением продолжительности жизни, не находит выражения в составе и объеме социальной инфраструктуры Москвы, в приоритете услуг и объектов, ориентированных на «серебряное» поколение. В Москве отсутствуют или минимальны такие важнейшие виды объектов, как геронтологические центры, дома дневного пребывания одиноких людей и людей преклонного возраста, дома для постоянного проживания пожилых людей и др. Серьезным вызовом для социальной жизни стало продление пенсионного возраста. Обострилась задача увеличения числа мест приложения труда, в том числе в сфере услуг.

Планировочный аспект проблемы заключается в превышении нормативной территориальной доступности в части ряда социально-значимых объектов и услуг повседневного спроса, а также некомфортной удаленности от потребителя объектов, предоставляющих услуги периодического спроса.

Общая формула современной жизни «быстро, разнообразно, удобно» актуальна не только для работающей части населения. В меньшей степени в таком подходе заинтересованы молодежь и пенсионеры. Приближение услуг к населению в границах квартала проживания или группы домов не исчерпывает своих возможностей набором услуг, предоставляемых сейчас на первых этажах жилой застройки. Существующая сеть ориентирована на размещение коммерческих объектов, ее функциональный состав и разнообразие не опираются на решение сообщества людей конкретного ареала проживания. Формируется шаблонный состав услуг торговли, бытового обслуживания, общественного питания, намного реже помещений для детских занятий, клубов для взрослых и людей преклонного возраста, микро-тренажерных залов. При этом «местная община» имеет потребность в общественной зоне в рамках своего дома для удовлетворения уникальных запросов в общении, совместном досуге, общественных мероприятиях, услугах консьержа, мини-интеллектуальном центре и др.

Адекватным ответом на существующие проблемы и эффективным инструментом совершенствования функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры являются:

1) формирование укрупненных планировочных элементов с модернизированной системой культурно-бытового обслуживания как результат оптимизации планировочного членения территории с учетом возрастающего значения градостроительных разделителей внешнего и внутреннего транспортных каркасов города;

2) учет особенностей поведенческих предпочтений населения, мнения жителей об удовлетворен-

ности социальной инфраструктурой при разработке документов градостроительного проектирования;

3) совершенствование модели функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры;

4) развитие системы общественных центров города;

5) интенсификация использования городских ресурсов (территории и существующей застройки) под развитие социальной инфраструктуры;

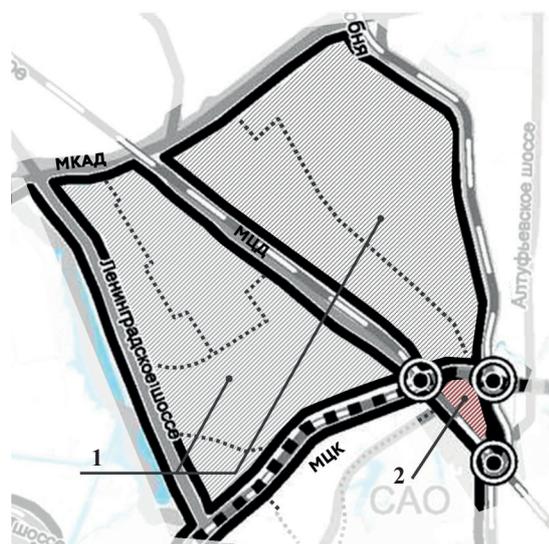
6) осуществление градостроительной оценки качества культурно-бытового обслуживания населения путем построения интегрального рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры.

На совершенствование пространственного развития социальной инфраструктуры воздействуют такие факторы, как активное развитие внешнего транспортного каркаса, разделяющего территорию города на крупные планировочные элементы; изменение потребительских ориентаций населения в сфере услуг, отсутствие свободных территориальных ресурсов в районах сложившейся застройки.

Усиление роли компонентов внешнего транспортного каркаса как планировочных разделителей обуславливает объективное вычленение крупных планировочных элементов территории города — планировочных районов и специализированных территорий (рис. 1). На примере северо-западного секто-

ра Москвы отражена конфигурация планировочных районов и специализированных территорий (рис. 2). Их границами являются Московские центральные диаметры (МЦД-1), (МЦД-2), (МЦД-3), Московское центральное кольцо (МЦК), основные общегородские автомобильные дороги. Предложено следующее определение планировочного района — это крупная планировочная расчетная единица территории города, выделенная в границах естественных и антропогенных разделителей с предоставлением населению всех видов услуг регионального уровня обслуживания. Такой подход позволяет создать микрогород, сократить радиусы доступности для услуг периодического и эпизодического спроса, приблизить услуги к потребителю, тем самым значительно сократить вынужденные поездки по городу (рис. 3). Специализированные территории расположены на стыке планировочных районов, прилегают к транспортно-пересадочным узлам межрегионального (агломерационного) значения. На специализированных территориях целесообразно формирование многофункциональных межрегиональных общественных центров с возможным включением международных общественно-деловых, культурно-образовательных, медицинских, спортивных, торгово-выставочных функций.

Градостроительное проектирование системы культурно-бытового обслуживания основывается не только на использовании нормативных докумен-



- границы планировочного района
boundaries of planning area
- границы административных районов
boundaries of administrative districts
- ТПУ агломерационного уровня
transport hubs of agglomeration level

1 ПЛАНИРОВОЧНЫЙ РАЙОН 1 PLANNING AREA

предусматривает размещение объектов социальной инфраструктуры для жизнеобеспечения населения в пределах пешеходной доступности от жилья
provides for the placement of social infrastructure facilities for the life support of the population within walking distance from housing

2 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ТЕРРИТОРИЯ 2 SPECIALIZED TERRITORY

включает объекты социальной инфраструктуры, обеспечивающие столичные функции
includes social infrastructure facilities that provide metropolitan functions

ПЛАНИРОВОЧНЫЕ РАЗДЕЛИТЕЛИ ТЕРРИТОРИИ — элементы внешнего транспортного каркаса
PLANNED TERRITORY DIVIDERS — elements of the external transport cage

- МЦК
Moscow Central Circle (MCC)
- МЦД
Moscow Central Diameters (MCD)
- МКАД
Moscow Automobile Ring Road (MKAD)
- основные автомобильные дороги
primary road networks

Рис. 1. Основные планировочные элементы территории города

Fig. 1. The main planning elements of the city territory

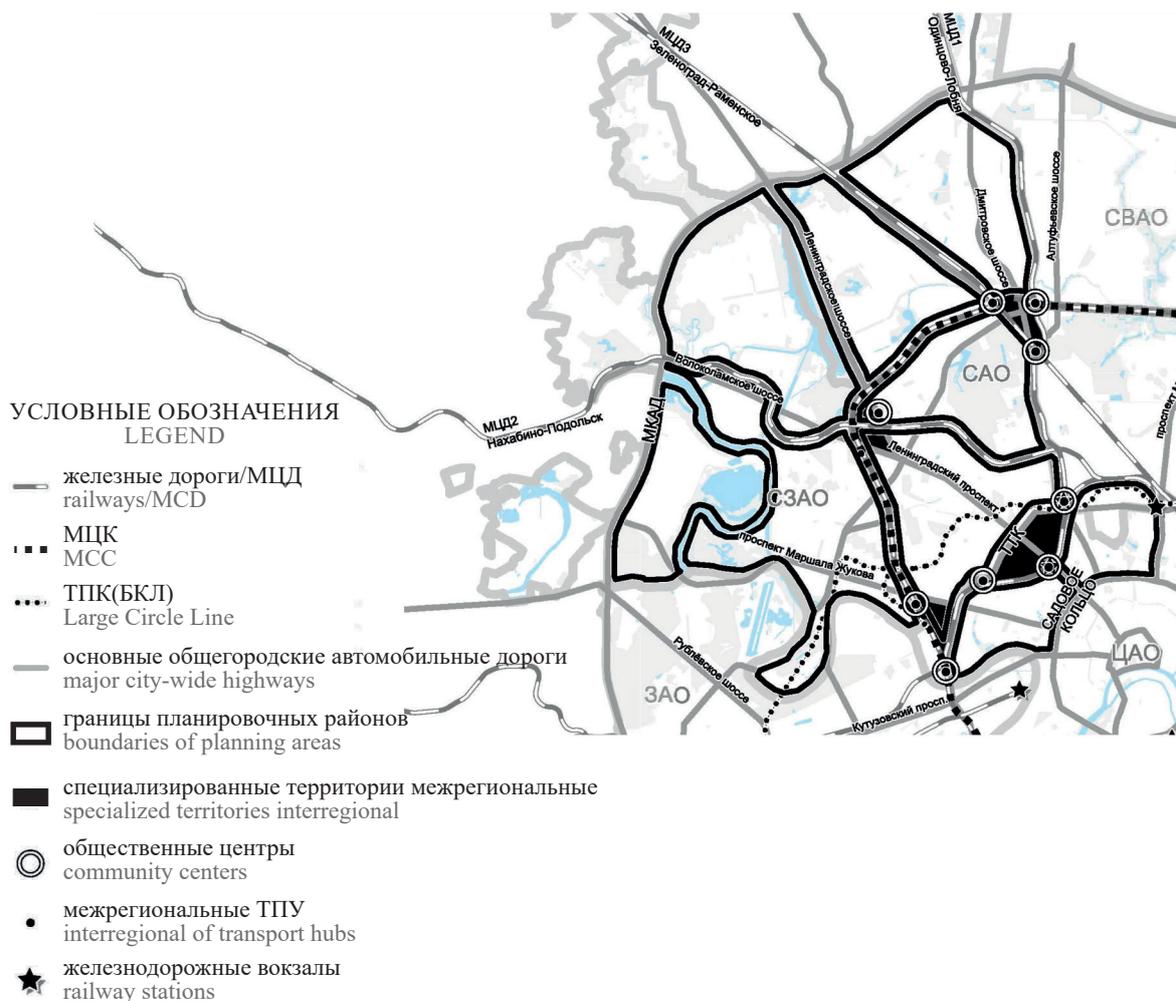


Рис. 2. Схема размещения планировочных элементов территории в структуре северо-западного сектора г. Москвы
Fig. 2. Layout of planning elements of the territory in the structure of the north-western sector of Moscow

тов, но и на результатах изучения поведенческих предпочтений жителей конкретной территории с учетом их социального состава (уровень образования, доходов, семейной структуры и др.), демографической структуры, анализа баланса мест приложения труда и трудовых ресурсов. Учет предпочтений населения осуществляется посредством сбора мнения об удовлетворенности текущим состоянием социальной инфраструктуры, пожеланий о перспективных видах объектов обслуживания. Инструментом сбора мнения жителей является социологический опрос, проводимый до начала разработки проекта. Применяются различные формы опроса: личное интервьюирование посетителей объектов культурно-бытового обслуживания, онлайн-опросы на сайтах управ, префектур, конкретных социальных объектов, сообществ жителей района и др. Также собирается информация о степени загрузки наиболее значимых объектов социальной инфраструктуры проектируемой и прилегающей территории.

Примеров использования подобной схемы предпроектного учета перечисленных характеристик в Москве и РФ тревожно мало. Это — единич-

ные случаи. Согласно ГК РФ на стадии согласования выполненного проекта проходят общественные обсуждения с населением, результаты которых носят лишь рекомендательный характер.

В рамках научно-исследовательской деятельности ГАУ «Институт Генплана Москвы» проведено пилотное социологическое исследование на примере северо-западного сектора Москвы. Его цель — выявление особенностей поведенческих предпочтений населения в части пользования объектами социальной инфраструктуры. По результатам исследования скорректированы основные направления развития социальной инфраструктуры и модернизирована модель функционально-пространственной организации объектов на территории города. Гипотетически, полученные итоги должны быть включены в состав исходных данных для разработки документов градостроительного проектирования. Однако шаг по созданию механизма сбора мнения и участия жителей в процессе проектирования еще предстоит сделать.

Изменения в потребительском поведении во многом обусловлены демографическими фак-

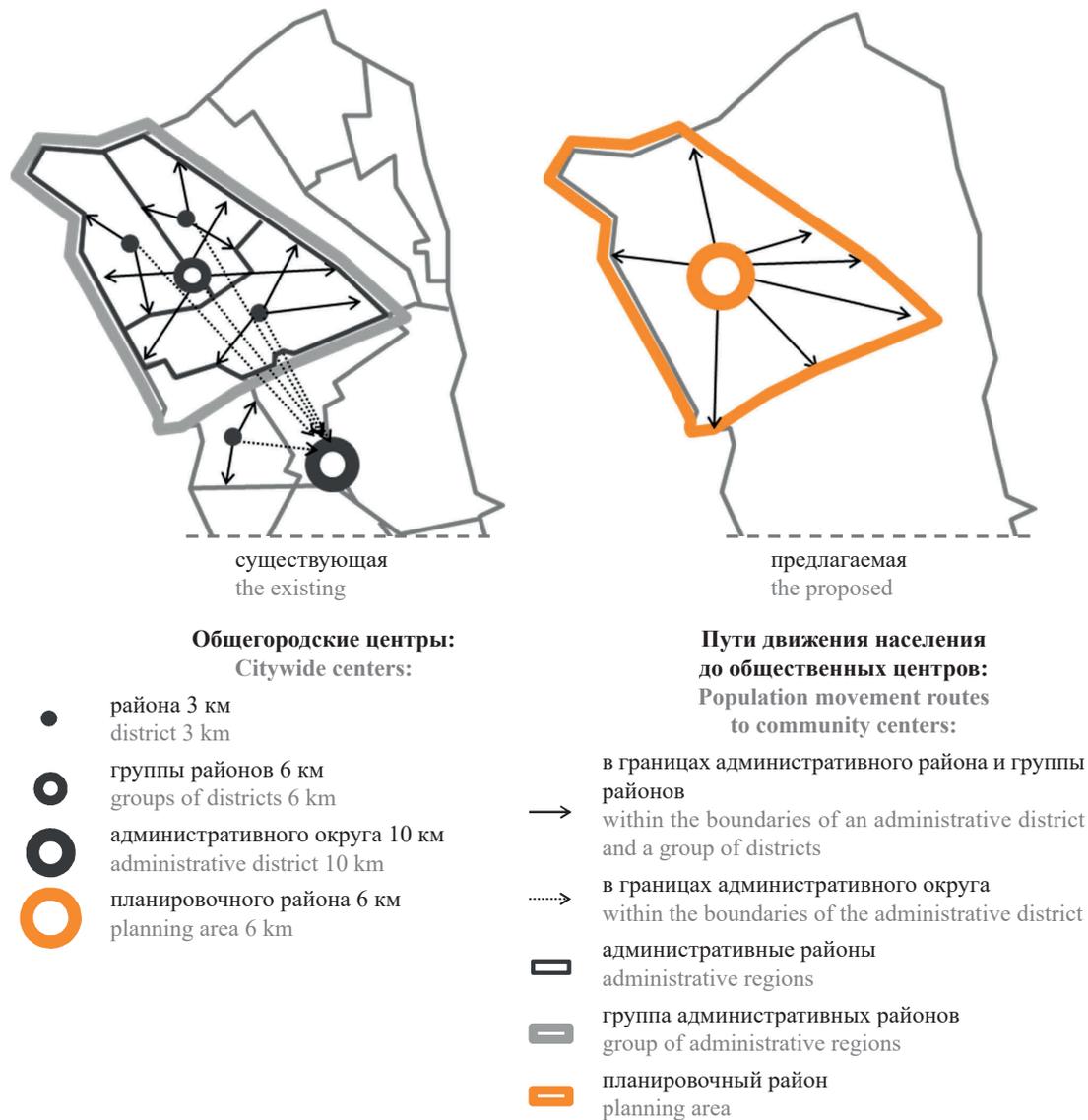


Рис. 3. Оптимизация передвижений населения за услугами периодического, эпизодического спроса

Fig. 3. Optimization of population movements for services of periodic, episodic demand

торами: увеличением продолжительности жизни, разделением населения на возрастные группы с разными системами ценностей и группами мотивирующих факторов. Происходящие демографические изменения демонстрируют, что теория поколений становится одним из основных инструментов, используемых маркетологами².

Особенности поведенческих предпочтений населения, выявленные в процессе исследования: изменение образа и стиля жизни, способов проведения свободного времени, роста востребованности услуг сферы досуга; высокий уровень использования информационных технологий — интернет-услуги в сфере торговли, общественного питания, обра-

зования, культуры, медицины, социальной защиты; увеличивающийся спрос на объекты культуры, спорта, дополнительного образования, социальной защиты; рост потребности населения в приближении услуг к месту проживания путем насыщения жилой среды объектами социальной инфраструктуры, увеличения плотности социальных функций на территории жилых районов; неудовлетворенная потребность в учреждениях дополнительного образования в районах проживания.

Перечислим социально-демографические группы населения и их жизненные поведенческие предпочтения:

- дети дошкольного возраста (3–6 лет) — вхождение в социум, получение первичных навыков обучения и взаимодействия в результате посещения дошкольных учреждений, секций и кружков дополнительного образования, детских театров, парков;

² Теория поколений разработана У. Штраусом и Н. Хоувом, описывает повторяющиеся поколенческие циклы и связанные с ними модели поведения в истории США, (“Generations”, 1991, “The Fourth Turning”, 1997).

использование мобильных устройств и компьютерных игр;

- дети и подростки школьного возраста (7–15 лет) — активное усвоение знаний из всех возможных источников, в том числе из виртуального мира, игр; период бодрствования сопровождается компьютером практически на 90 % времени, не мыслят себя без компьютеров, мобильных телефонов и интернета; легко мотивируются увлекательными проектами и быстро достигают целей;

- молодежь (16–24 лет) — сохранение и поддержание здоровья; интерес к качеству обслуживания; изменение приоритетов — сокращение времени на бытовые заботы (кейтеринг, клининг) в пользу более интересной, продуктивной, творческой деятельности; постоянное обучение и развитие, самозанятость (фриланс); имеют высокие ожидания и запросы; потребность в активном спорте, в том числе экстремальном (покупки туристического и спортивного снаряжения); посещение интернет-кафе, клубов по интересам, досугово-развлекательных центров;

- наиболее активная группа населения трудоспособного возраста (25–45 лет) — стремление сократить время на покупки, бытовые услуги и др., активное потребление онлайн-услуг в сфере питания, образования, культуры, социальной защиты, бытового обслуживания, торговли; постоянное использование электронной почты, социальных сетей, смартфонов, мобильных приложений; покупка товаров в кредит; пользование услугами домработниц и нянь; пользование услугами косметических и спа-салонов, занятия в фитнес-центрах и спортивных клубах;

- активная группа населения трудоспособного возраста (46–60 лет) — рациональное потребление — выбор надежных и качественных товаров по умеренным ценам; глубокий интерес к здоровому образу жизни, эффективной деятельности, экологическому питанию; выявление новых областей личного интереса;

- менее активная группа населения старше трудоспособного возраста старше 60 лет — глубокая потребность в социальной занятости, нужности близким и обществу, желание поделиться профессиональными знаниями и опытом, забота о своем здоровье; менее регулярно совершают покупки онлайн; в основном предпочитают совершать покупки непосредственно в магазине; увлечение туризмом.

Совершенствование модели функционально-пространственной организации социальной инфраструктуры включает предложения по функциональной структуре, типологии объектов, рекомендуемым радиусам доступности, характере размещения и т.д.

Модель функциональной организации предусматривает развитие типологического состава объектов двух уровней обслуживания — регионального и межрегионального. Региональный уровень обслуживания предназначен для обеспечения системы

жизнеобеспечения постоянного населения и включает стандартные и избирательные услуги повседневного, периодического и эпизодического спроса. На межрегиональном уровне предоставляются эпизодические услуги для групп дневного населения в целях обеспечения столичных функций города (рис. 4). Основными принципами совершенствования модели функциональной организации объектов системы жизнеобеспечения населения являются: увеличение количества и разнообразия видов услуг, плотности социальных функций; приближение услуг к потребителям в зонах концентрации основных групп дневного населения по территории города.

Модель пространственной организации социальной инфраструктуры в структуре застроенных территорий города предусматривает размещение объектов в следующих планировочных элементах территории города (рис. 5): регионального уровня жизнеобеспечения населения в планировочном районе; межрегионального уровня обеспечения столичных функций города — на специализированных территориях в транспортно-пересадочных узлах (ТПУ) агломерационного значения.

Особенности размещения объектов регионального уровня жизнеобеспечения населения включают:

- размещение объектов стандартного обслуживания повседневного спроса в пешеходной доступности от жилья в основном для маломобильных групп населения. Основной пространственной единицей является микрорайон с выделением в нем кварталов и урбан-блоков с использованием 1–3 этажей жилых зданий под объекты первой необходимости;

- размещение объектов избирательного обслуживания периодического и эпизодического спроса в ТПУ на территории планировочного района для мобильных социально-демографических групп населения.

Оптимизация системы общественных центров в структуре застроенных территорий предусматривает формирование общегородских центров на внешнем транспортном каркасе и локальных центров на внутреннем транспортном каркасе города с расположением в их составе объектов социальной и административно-деловой инфраструктуры. С учетом транспортного каркаса и предлагаемой пространственной организации социальной инфраструктуры система общегородских центров сформирована агломерационными, межрайонными, районными уровнями. Центры агломерационного уровня размещаются в узлах внешнего каркаса на основе крупнейших ТПУ с наибольшим потоком дневного населения. Социальная инфраструктура в составе центра агломерационного уровня предоставляет уникальные услуги эпизодического спроса, все виды массовых услуг периодического спроса. Функциональный состав общественной застройки представлен объектами социальной, административной, общественно-деловой, в том числе логистической

Функции, уровень, вид обслуживания Functions, level, type of service		Периодичность посещения, пространственная доступность Frequency of visits, spatial availability	Виды объектов Object types
Жизнеобеспечение населения / Life support of the population	Стандартное / Standard	ПОВСЕДНЕВНАЯ 1 раз в день — несколько раз в неделю CASUAL Once a day — several times a week	<ul style="list-style-type: none"> Дошкольные образовательные учреждения / Preschool educational institutions Общеобразовательные школы / Secondary schools Библиотеки / Libraries Учреждения клубного типа* / Club type establishments* Центры дополнительного развития детей и подростков* Centers for additional development of children and adolescents* Спортивные залы, тренажерные залы* / Sports halls, gyms* ФОКи* / Physical Culture and Sports Centres* Магазины «шаговой» доступности* / Walking distance shops* Аптеки* / Pharmacies* Приемные пункты ремонтных мастерских / Reception points of repair shops Парикмахерские / Hairdressers Территориальные поликлиники для взрослых и детей, медицинские центры Territorial polyclinics for adults and children, medical centers Супермаркеты / Supermarkets Кафе, предприятия быстрого питания / Cafes, fast food establishments
	Региональный / Regional	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ 1 раз в неделю — 1–2 раза в месяц PERIODIC Once a week — 1–2 times a month	<ul style="list-style-type: none"> Музыкальные, художественные школы, школы искусств / Music, art schools, art schools Клубы интеллектуальных игр и спорта** / Mind games and sports clubs** Центры социального обслуживания, клиентские службы** Social service centers, customer services** Мастерские бытовых услуг, бани, ломбарды Consumer services workshops, baths, pawnshops Комплексные предприятия бытового обслуживания Complex consumer services enterprises Фабрики прачечные, фабрики химчистки / Laundry factories, dry cleaning factories Специализированные ДООУ / Specialized pre-school educational institutions Образовательные учреждения (кадетские школы, школы-интернаты), специализированные образовательные учреждения для детей с физическими и психическими отклонениями, колледжи Educational institutions (cadet schools, boarding schools), specialized educational institutions for children with physical and mental disabilities, colleges Подстанции скорой медицинской помощи, ветеринарные клиники Ambulance substations care, veterinary clinics Многопрофильные и специализированные больницы, диспансеры, хосписы, дома сестринского ухода, реабилитационные центры, социально-реабилитационные центры, дома-интернаты для инвалидов, престарелых Multidisciplinary and specialized hospitals, dispensaries, hospices, nursing homes, rehabilitation centers, social rehabilitation centers, boarding homes for the disabled, the elderly Многопрофильные спортивные объекты / Multidisciplinary sports facilities Специализированные спортивные центры, стадионы, дворцы спорта, универсальные спортивно-зрелищные залы, ДЮСШ, СДЮШОР Specialized sports centers, stadiums, sports palaces, universal sports and entertainment halls, junior sports school, children and youth sports school Культурно-досуговые центры, дома культуры** Cultural and leisure centers, houses of culture** Музейно-выставочные залы / Museum and exhibition halls Театральные студии** / Theater studios** Кинотеатры** / Cinemas** Культовые объекты / Iconic objects Выставки, художественные галереи, театры, музеи, музейные комплексы, усадьбы Exhibitions, art galleries, theaters, museums, museum complexes, estates Торговые центры, торговые комплексы, гипермаркеты Shopping centers, shopping malls, hypermarkets Рестораны, бары / Restaurants, bars Хостелы / Hostels Гостиницы, гостиничные комплексы, мотели, кемпинги Hotels, hotel complexes, motels, campings
	Избирательное / Electoral	ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ несколько раз в год EPISODIC several times a year	Транспортная: 30 мин Transport 30 min
Обеспечение столичных функций Providing metropolitan functions	ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ 1 раз в год в несколько лет EPISODIC Once a year in several years	40 мин 40 minutes	<ul style="list-style-type: none"> * первого уровня ** второго уровня *** третьего уровня
Межрегиональный Interregional			

Рис. 4. Модель функциональной организации социальной инфраструктуры

Fig. 4. Model of the functional organization of social infrastructure

ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА
PLANNING ELEMENTS OF THE CITY TERRITORY

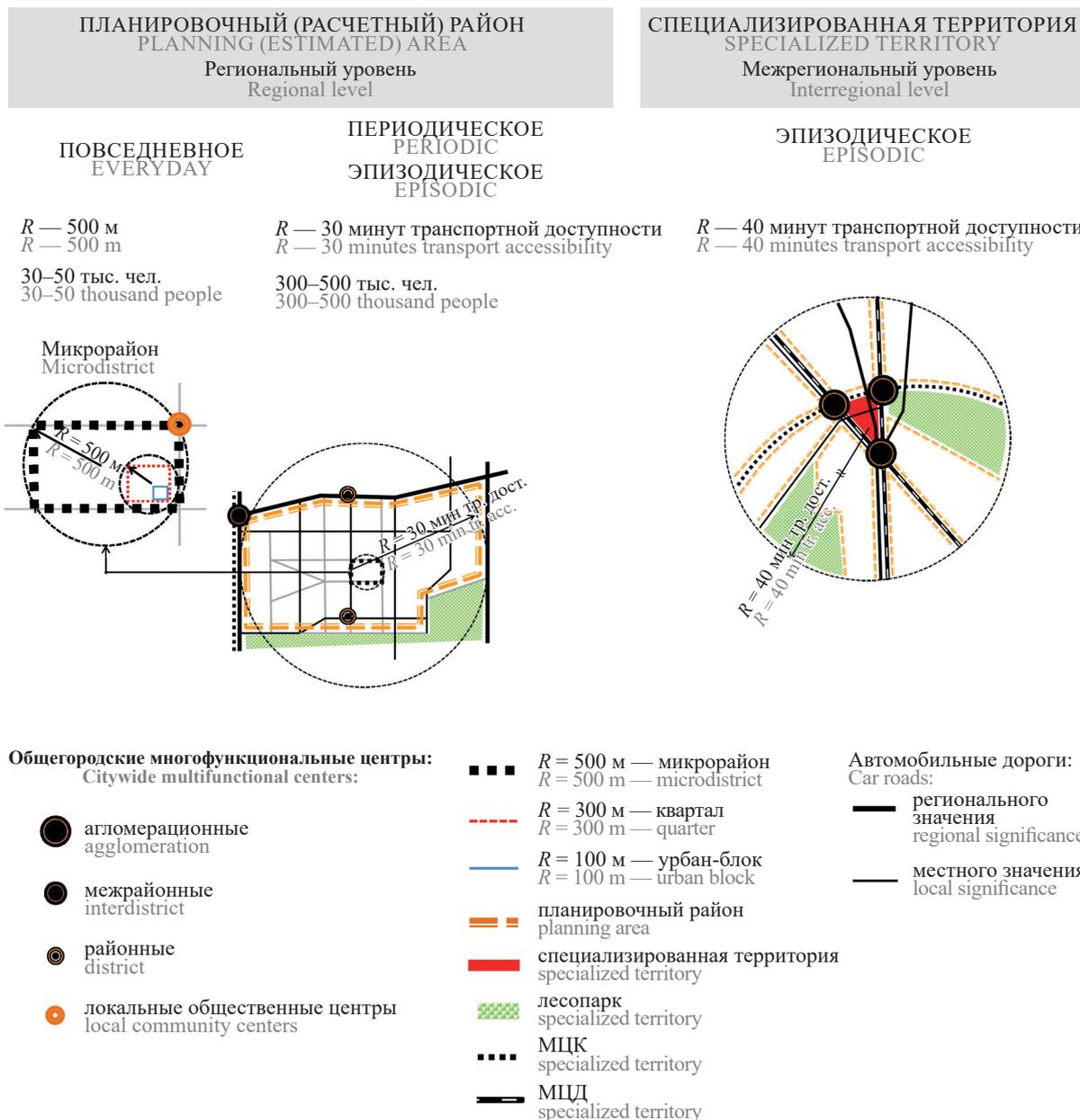


Рис. 5. Модель пространственной организации социальной инфраструктуры в структуре застроенных территорий города
Fig. 5. Model of the spatial organization of social infrastructure in the structure of built-up areas of the city

инфраструктуры. Приоритетным вариантом объемно-планировочного решения являются многофункциональные комплексы.

В составе межрайонных общественных центров формируются очаги социальной активности, включающие услуги периодического спроса: торговли и услуг, образования, спорта, культуры, социальной защиты, здравоохранения, а также административные и деловые, логистические функции.

Районные центры формируются в зонах узлов внутреннего каркаса, обеспеченных станциями метрополитена. Структура общественных центров планировочного района приоритетно представлена объектами и учреждениями повседневного и пери-

одического спроса, ориентированными на постоянных жителей. Обслуживание характеризуется разнообразным перечнем видов объектов, обеспечивающих качественную среду проживания, максимально отвечающую на запросы жителей (рис. 5, 6).

Локальные центры формируются на основе главных элементов планировочной структуры подрайона, являют собой единую систему общественных пространств и объектов общественного назначения для всех микрорайонов в составе подрайона. Социальная инфраструктура в составе локальных центров обеспечивает постоянное население услугами повседневного спроса с радиусом доступности от 300 до 500 м. Перечень объектов, наполняющих

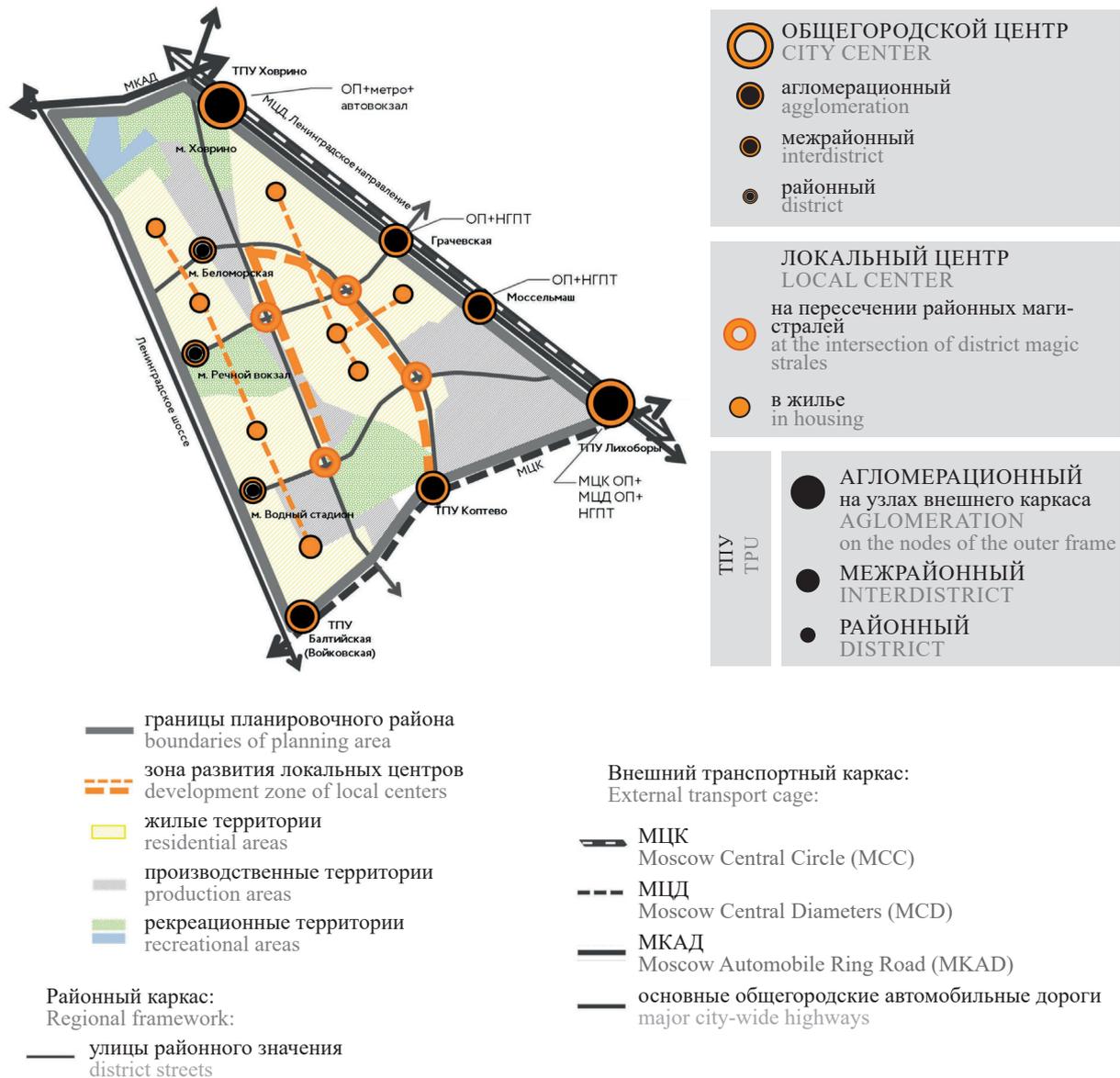


Рис. 6. Система общественных центров в структуре планировочного района
Fig. 6. The system of community centers in the structure of the planning area

локальный центр подрайона, включает детские сады, общеобразовательные школы, детские досуговые учреждения, физкультурно-оздоровительные комплексы, поликлиники, учреждения психологической помощи, супермаркеты, приемные пункты прачечных и химчисток, парикмахерские, мастерские бытового ремонта, прочие. Социальная инфраструктура локального центра — это отдельно стоящие объекты с земельным участком (детские сады, школы) и учреждения, размещенные на первых трех нежилых этажах жилой застройки.

Процесс совершенствования социальной инфраструктуры нацелен главным образом на территории сложившейся застройки с минимумом свободных земельных ресурсов или с их полным отсутствием. Вследствие этого чрезвычайно актуальными становятся пути повышения эффективности использова-

ния существующих резервов застройки и открытых общественных пространств города.

Для обеспечения комплексного развития общественных функций обобщены используемые и разработаны новые объемно-планировочные приемы размещения объектов социальной инфраструктуры в сложившейся городской застройке. Они включают использование первых этажей жилых и нежилых зданий, встроенно-пристроенных помещений, подземного пространства объектов общественно-деловой застройки, эксплуатируемых крыш жилых и общественных зданий, открытых и озелененных общественных пространств города, создание многофункциональных объектов с преобладанием социально-значимых компонентов. Применение перечисленных приемов размещения объектов социальной инфраструктуры в городской застройке позволит увеличить разнообразие и объем предоставляемых

услуг на 15 % при сокращении нового строительства на 12 % и расхода территории на 18 %.

Новаторским объемно-планировочным приемом является формирование многофункциональных общественных комплексов (МОК), главным своеобразием которых служит объединение в их составе объектов культуры, спорта, дополнительного образования, в недостаточной мере присутствующих в городской среде в настоящее время. Создание социально-ориентированных многофункциональных комплексов отвечает современным потребностям населения, выявленным по итогам социологического опроса жителей об удовлетворенности развитием социальной инфраструктуры.

Преимущества новой формы объединения функций в МОК:

- преобладание социальных услуг (спортивно-оздоровительных, образовательных, культурных) над торговой, административно-деловой, логистической составляющими;
- ориентация МОК трех уровней на определенный состав пользователей: МОК первого уровня приближен к потребителю, обеспечивает километровой радиус пространственной доступности, предназначен, в первую очередь, для повседневного посещения группами маломобильного населения (детьми, людьми преклонного возраста), проживающими на прилегающей территории; МОК второго уровня предоставляет услуги в радиусе 3 км, приоритетно ориентирован на подростков и молодежь с посещением 1–2 раза в неделю; МОК третьего уровня рассчитан на радиус обслуживания более 5 км, предполагает использование всеми группами населения 1–2 раза в месяц;
- МОК первого и второго уровней могут быть интегрированы в жилую застройку, важно, что наличие МОК повышает престиж жилой территории, ее инвестиционные показатели, так как отвечает на потребность групп населения в уникальных услугах, например, редких видах спорта, актуальных видах дополнительного внешкольного образования, учреждений социальной защиты (домов отдыха для одиноких людей преклонного возраста с дневным пребыванием и др.);
- комплексный функциональный состав МОК обеспечивает больше возможности для трудоустройства вблизи ареала проживания.

Многофункциональные общественные комплексы различного уровня предлагается размещать на территории групп жилых кварталов, групп жилых районов и административных округов:

- на базе объектов дополнительного образования и физкультурно-оздоровительных комплексов (площадь территории 0,7–1,2 га, общая площадь комплекса — 10–20 тыс. м²; территориальная доступность 1,5–3 км; основными объектами МОК являются: музыкальная, художественная школа, школа искусств; центр дополнительного развития детей

и подростков; студия кино, вокала; анти-стрессовый центр; клуб интеллектуальных игр и спорта и др.);

- на базе молодежного культурно-досугового центра (площадь территории 1,5–2,0 га, общая площадь комплекса — 20–50 тыс. м²; территориальная доступность 3–6 км; основные объекты: дом культуры; театральная площадка для выездных представлений; многозальный кинотеатр; выставка; интерактивный музей; клубные помещения; творческие мастерские и тематические мастер-классы и др.);

- на базе спортивно-зрелищного и культурного центра (площадь территории 2,5–10,0 га, общая площадь комплекса, паттерны проведения — 50–200 тыс. м²; территориальная доступность 10 км и более; основные объекты: стадион для проведения спортивно-зрелищных мероприятий; ледовая арена; аквапарк, бассейн; скалодром; тренировочные залы и др.).

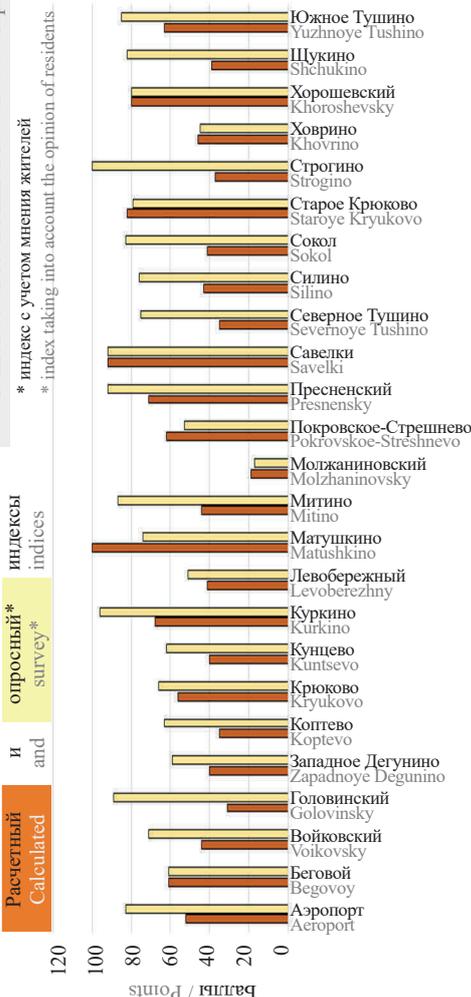
Дополнительные инвестиционные объекты в составе всех видов МОК — помещения торгового, логистического, административного и общественно-делового назначения, а также общественного питания и бытового обслуживания.

Инструментом оценки градостроительного развития социальной инфраструктуры является интегральный рейтинг районов. Рейтинг районов по уровню развития сферы обслуживания важен для оценки существующего состояния сети, исследования удовлетворенности жителей уровнем и качеством инфраструктуры в районе проживания, учета их пожеланий по перспективе развития территории, определения приоритетов при формировании целостной городской среды для повышения качества жизни москвичей. Интегральный рейтинг районов города позволяет также более креативно реагировать на актуальные проблемы, генерируя широкий спектр идей для развития сообщества и территории с учетом мнения жителей, планировать пространственную доступность объектов социальной инфраструктуры, определять функциональный состав общественных комплексов.

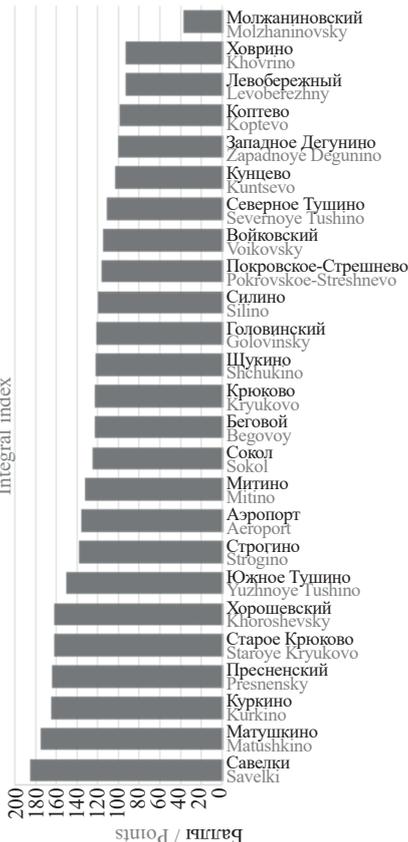
Построение рейтинга основывается на расчете интегрального индекса развития социальной инфраструктуры как суммы баллов индексов фактической (расчетной) обеспеченности районов и удовлетворенности жителей состоянием сети объектов обслуживания (по отраслям и видам объектов). Этапы разработки интегрального индекса дают возможность определить для каждого района «проблемные» виды объектов, требующие дальнейшего развития, в том числе в составе районов с высоким рейтингом.

Интегральный индекс развития социальной инфраструктуры рассчитан для двадцати пяти районов северо-западного сектора Москвы (рис. 7). Описывая детали на примере Пресненского района, показательно, что, несмотря на позитивную картину в целом, объекты спорта, дополнительного образования получили неудовлетворительную оценку и требуют развития. По объектам дошкольного и школьного

1. Индексы развития социальной инфраструктуры по районам Москвы
1. Indices of social infrastructure development by districts of Moscow



Интегральный индекс
Integral index

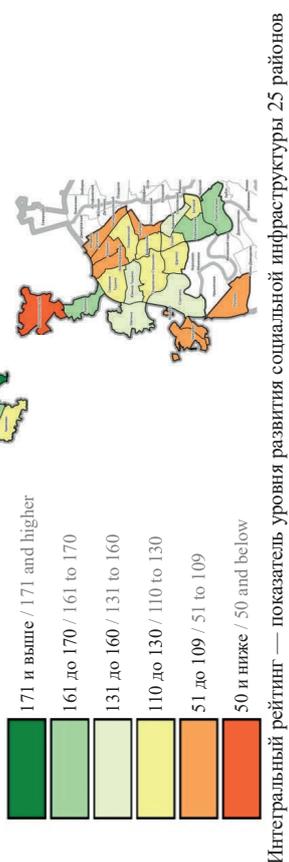


Сумма в баллах фактической обеспеченности районов объектами и удовлетворенности жителей уровнем развития социальной инфраструктуры по отраслям
The sum, in points of indices, of the actual provision of districts with facilities and satisfaction of residents with the level of development of social infrastructure by industry

Сумма в баллах расчетного и опросного индексов развития социальной инфраструктуры
The sum in points of the calculated and polling indices of the development of social infrastructure

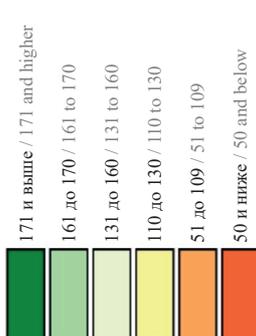
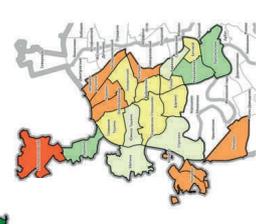
2. Рейтинги районов
2. Rating of districts

1. Рейтинги районов по уровню развития социальной инфраструктуры (место)
1. Ratings of districts by the level of development of social infrastructure (place)



Сумма в баллах фактической обеспеченности районов объектами и удовлетворенности жителей уровнем развития социальной инфраструктуры по отраслям
The sum, in points of indices, of the actual provision of districts with facilities and satisfaction of residents with the level of development of social infrastructure by industry

Сумма в баллах расчетного и опросного индексов развития социальной инфраструктуры
The sum in points of the calculated and polling indices of the development of social infrastructure



Интегральный рейтинг — показатель уровня развития социальной инфраструктуры 25 районов г. Москвы. Чем больше интегральный индекс развития социальной инфраструктуры, тем выше рейтинг района по уровню развития социальной инфраструктуры. Максимальному значению интегрального индекса соответствует первый (наивысший) рейтинг района по уровню развития социальной инфраструктуры.
The integral rating is an indicator of the level of development of social infrastructure in 25 districts of Moscow. The higher the integral index of social infrastructure development, the higher the district's rating in terms of social infrastructure development. The first (highest) rating of the district in terms of the level of development of social infrastructure corresponds to the maximum value of the integral index.

Рис. 7. Определение рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры (инструмент для градостроительной оценки существующего состояния сети обслуживания)
Fig. 7. Determination of the rating of districts by the level of development of social infrastructure (a tool for urban planning assessment of the existing state of the service network)

образования, культуры фиксируются расхождения в расчетной и опросной оценке, наличие конфликтных ситуаций, также требующих решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный социологический опрос «Удовлетворенность жителей социальной инфраструктурой района» на примере 25 районов Москвы показал, что для территории всех районов характерна общая структура дефицитности объектов социальной инфраструктуры, различия состоят только в интенсивности дефицита. Наиболее востребованными жителями и дефицитными являются объекты спорта, культуры, дополнительного образования, торговли: например, такие как физкультурно-оздоровительный комплекс с бассейном (отмечен как дефицитный более 20 % респондентов в 23 из 25 районов города). Наибольший дефицит физкультурно-оздоровительных комплексов с бассейнами ощущают жители Молжаниновского района (77 % респондентов). Один из наиболее дефицитных объектов, причем как в периферийных районах города, так и в центральных (Пресненский, Сокол, Беговой), — «Рынок, ярмарка выходного дня» (отметили от 20 до 35 % респондентов). В «спальных» районах Москвы не хватает качественных развлекательных объектов, в частности кинотеатров. Кинотеатры в настоящее время — не только место просмотра кинофильмов, но и своеобразный центр территориальных сообществ, формирующих правильные паттерны проведения свободного времени и саморазвития личности. Анализ нехватки объектов социальной инфраструктуры для молодежи (возрастной группы 18–24 лет) продемонстрировал, что возрастает спрос на услуги фитнес-центров, кинотеатров, клубов, предприятий питания, выставочных залов, клубов по интересам, интеллект-центров (причем, в некоторых случаях дефицит подобных видов объектов сферы услуг составляет порядка 80 %). Таким образом, исследование имеет огромное значение для мониторинга реализации градостроительных программ в части достижения целевых показателей развития социальной инфраструктуры районов. Полученные результаты также имеют существенное значение для совершенствования нормативной базы градостроительного проектирования.

Целью описанных трансформаций функционально-пространственной организации системы

культурно-бытового обслуживания населения является достижение комплексного социально-экономического эффекта, в первую очередь, социального и в перспективе экономического, обусловленных повышением качества городской среды и условий проживания. Одним из главных эффектов выступает тема сокращения внутригородской маятниковой миграции, снижения загруженности улично-дорожной сети вследствие приближения услуг к месту проживания населения и в зонах концентрации дневного населения, а также создания дополнительных мест приложения труда вблизи ареала проживания. Социально весомым результатом станет высвобождение у жителей дополнительного времени на досуг и отдых, сопровождаемое созданием комфортных условий для духовного и физического развития: культурного общения, личностного развития, регулярных занятий спортом и пр. В перспективе данный процесс повлияет на изменение портрета жителя, реализует задачу повышения качества человеческого капитала. Благоприятные условия проживания, обеспечиваемые широкой палитрой предоставляемых культурно-бытовых услуг, вызывают ощущение домашнего комфорта и уюта, что активизирует заинтересованность в судьбе района проживания, усиливает вовлеченность в социальную жизнь. Подобный высокий уровень самосознания делает возможным участие жителя в принятии решений, со-управлении развитием своей территории.

Предложенные подходы к организации социальной инфраструктуры обеспечат повышение качества жизни москвичей с учетом принципов формирования современной жилой и общественной среды в соответствии с актуальными потребностями жителей, повышение качества застроенных территорий. Ожидаемый социальный эффект от совершенствования структуры культурно-бытового обслуживания населения в увязке с перспективной планировочной системой Москвы включает: сокращение затрат времени населения на передвижения по городу с трудовыми и культурно-бытовыми целями; снижение нагрузки на транспортную систему города; перераспределение бюджета времени человека с учетом уменьшения «транспортной» доли и увеличения свободных часов на досуг, физическое и духовное развитие.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бородатова Л.Ю.* Развитие социальной инфраструктуры в экономическом пространстве: теоретический аспект // *Современные проблемы науки и образования.* 2013. № 2. С. 359.
2. *Макар С.В., Строев П.В., Морковкин Д.Е.* Акценты развития макрорегионального пространства России: социальная инфраструктура // *Экономика*

1. *в промышленности.* 2019. Т. 12. № 3. С. 367–376. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-3-367-376

3. *Богер Т.Н.* Социальная инфраструктура как компонент качества жизни и социально-экономического развития региона // *Проблемы современной науки и образования.* 2014. № 8 (26). С. 45–47.

4. *Смирнова О.А.* Социальная инфраструктура региона: сущность, проблемы и перспективы разви-

тия // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2014. № 2 (38). С. 87–91.

5. Социально-экономические проблемы развития отдельных отраслей сферы услуг: сб. ст. / под ред. Н.А. Восколович, И.Н. Молчанова. М.: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017. 199 с.

6. Аuzан А.А. О возможности перехода к экономической стратегии, основанной на специфике человеческого капитала в России // Журнал Новой экономической ассоциации. 2015. № 2 (26). С. 243–248.

7. Сапожникова Т.А., Кузнецова А.И. Управление развитием социальной инфраструктуры города. Теоретические аспекты // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Сер. 1: Экономика и управление. 2014. № 2 (8). С. 105–112.

8. Carlsson R., Otto A., Hall J.W. The role of infrastructure in macroeconomic growth theories // Civil Engineering and Environmental Systems. 2013. Vol. 30. Issue 3–4. Pp. 263–273. DOI: 10.1080/10286608.2013.866107

9. Семина И.А., Носонов А.М., Куликов Н.Д., Федотов Ю.Д., Фоломейкина Л.Н. Территориальная организация третичного сектора экономики: монография. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2017. 208 с.

10. Пивкина Н.Ю. Умные города как новый стандарт качества жизни населения // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. 2019. Т. 9. № 4 (40). С. 120–125. DOI: 10.26794/2226-7867-2019-9-4-120-125

11. Колодий Н.А., Иванова В.С., Гончарова Н.А. Умный город: особенности концепции, специфика адаптации к российским реалиям // Социологический журнал. 2020. Т. 26. № 2. С. 102–123. DOI: 10.19181/socjour.2020.26.2.7268

12. Куприяновский В.П., Аленков В.В., Соколов И.А., Зажигалкин А.В., Климов А.А., Степаненко А.В. и др. Умная инфраструктура, физические и информационные активы, Smart Cities, BIM, GIS и IOT // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5. № 10. С. 55–86.

13. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives // Journal of Urban Technology. 2015. Vol. 22. Issue 1. DOI: 10.1080/10630732.2014.942092

14. Angelidou M. The Role of Smart Characteristics in the Plans of Fifteen Cities // Journal of Urban Technology. 2017. Vol. 4. Issue 24. Pp. 3–28.

15. Camboim G.F., Zawislak P.A., Pufal N.A. Driving elements to make cities smarter: Evidences from European projects // Technological Forecasting and Social Change. 2019. Vol. 142. Pp. 154–167. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.09.014

16. Joshi S., Saxena S., Godbole T. Developing smart cities: an integrated framework // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 93. Pp. 902–909. DOI: 10.1016/j.procs.2016.07.258

17. Appio F., Lima M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges // Technological Forecasting and Social Change. 2019. Vol. 142. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018

18. Robinson R. Why Smart Cities Still aren't Working for us after 20 years. And how we can fix them. URL: <https://theurbantechnologist.com/2016/02/01/why-smart-cities-still-arent-working-for-us-after-20-years-and-how-we-can-fix-them/>

19. Cohen B. The 3 Generations of Smart Cities from 1.0 to 3.0. URL: <https://www.smartcitieslibrary.com/the-3-generations-of-smart-cities>

20. Vakali A., Angelis L., Giatsoglou M. Sensors talk and humans sense towards a reciprocal collective awareness smart city framework // 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2013. DOI: 10.1109/iccw.2013.6649226

21. Barns S., Cosgrave E., Acuto M., Mcneill D. Digital infrastructures and urban governance // Urban Policy and Research. 2017. Vol. 35. Issue 1. Pp. 20–31. DOI: 10.1080/08111146.2016.1235032

22. Гайкова Л.В. Развитие системы общественного обслуживания в отечественном градостроительстве нового времени // Вестник ИрГТУ. 2011. № 7 (54) С. 33–40.

23. Страшнова Ю.Г., Страшнова Л.Ф., Жукова Т.И. Оценка градостроительного развития социальной инфраструктуры на основе интегрального рейтинга районов (на примере 25 районов Москвы) // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 279–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.279-293

Поступила в редакцию 9 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 6 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 6 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Геннадьевна Страшнова** — кандидат технических наук, доцент, руководитель Мастерской «Социальная инфраструктура»; **Государственное автономное учреждение «Научно-исследовательский и проектный институт Генерального плана города Москвы»** (ГАУ «Институт Генплана Москвы»); 125047, г. Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14; ustrashnova@genplanmos.ru;

Людмила Федоровна Страшнова — кандидат архитектуры, старший научный сотрудник, начальник сектора Мастерской «Социальная инфраструктура»; **Государственное автономное учреждение «Научно-исследовательский и проектный институт Генерального плана города Москвы»** (ГАУ «Институт Генплана Москвы»); 125047, г. Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14; ustrashnova@genplanmos.ru.

REFERENCES

1. Borodatova L.Yu. Development of social infrastructure in economic space: theoretical aspect. *Modern Problems of Science and Education*. 2013; 2:359. (rus.).
2. Makar S.V., Stroeve P.V., Morkovkin D.E. Accents of the development of the macro-regional space of Russia: social infrastructure. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2019; 12(3):367-376. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-3-367-376 (rus.).
3. Boger T.N. Social infrastructure as a component of the quality of life and socio-economic development of the region. *Problems of Modern Science and Education*. 2014; 8(26):45-47. (rus.).
4. Smirnova O.A. Region social infrastructure: essence, problems and perspectives of development. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2014; 2(38):87-91. (rus.).
5. *Socio-economic problems of development of individual branches of the service sector: collection of articles* / ed. N.A. Voskolovich, I.N. Molchanova. Moscow, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University, 2017; 199. (rus.).
6. Auzan A.A. On the possibility of transition to an economic strategy based on the specifics of human capital in Russia. *Journal of the New Economic Association*. 2015; 2(26):243-248. (rus.).
7. Sapozhnikova T.A., Kuznetsova A.I. Management of municipal social infrastructure development. Theoretical aspects. *Bulletin of the Moscow University named after S.Yu. Witte. Ser. 1: Economics and Management*. 2014; 2(8):105-112. (rus.).
8. Carlsson R., Otto A., Hall J.W. The role of infrastructure in macroeconomic growth theories. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2013; 30(3-4):263-273. DOI: 10.1080/10286608.2013.866107
9. Semina I.A., Nosonov A.M., Kulikov N.D., Fedotov Yu.D., Folomeykina L.N. *Territorial organization of the tertiary sector of the economy: monograph*. Saransk, Publishing house of Mordovian University, 2017; 208. (rus.).
10. Pivkina N.Yu. Smart cities as a new quality of life standard. *Humanitarian Sciences. Financial University Bulletin*. 2019; 9(4):(40):120-125. DOI: 10.26794/2226-7867-2019-9-4-120-125 (rus.).
11. Kolodii N.A., Ivanova V.S., Goncharova N.A. Smart city: the concept and its adaptation to the Russian context. *Sociological Journal*. 2020; 26(2):102-123. DOI: 10.19181/socjour.2020.26.2.7268 (rus.).
12. Kupriyanovsky V., Alenkov V., Sokolov I., Zazhigalkin A., Klimov A., Stepanenko A. et al. Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IOT. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017; 5(10):55-86. (rus.).
13. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*. 2015; 22(1). DOI: 10.1080/10630732.2014.942092
14. Angelidou M. The Role of Smart Characteristics in the Plans of Fifteen Cities. *Journal of Urban Technology*. 2017; 4(24):3-28.
15. Camboim G.F., Zawislak P.A., Pufal N.A. Driving elements to make cities smarter: Evidences from European projects. *Technological Forecasting and Social Change*. 2019; 142:154-167. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.09.014
16. Joshi S., Saxena S., Godbole T. Developing smart cities: an integrated framework. *Procedia Computer Science*. 2016; 93:902-909. DOI: 10.1016/j.procs.2016.07.258
17. Appio F., Lima M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges. *Technological Forecasting and Social Change*. 2019; 142:1-14. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018.
18. Robinson R. Why Smart Cities Still aren't Working for us after 20 years. And how we can fix them. URL: <https://theurbantechnologist.com/2016/02/01/why-smart-cities-still-arent-working-for-us-after-20-years-and-how-we-can-fix-them/>
19. Cohen B. *The 3 Generations of Smart Cities from 1.0 to 3.0*. URL: <https://www.smartcitieslibrary.com/the-3-generations-of-smart-cities>
20. Vakali A., Angelis L., Giatsoglou M. Sensors talk and humans sense towards a reciprocal collective awareness smart city framework. *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. 2013. DOI: 10.1109/iccw.2013.6649226
21. Barns S., Cosgrave E., Acuto M., McNeill D. Digital infrastructures and urban governance. *Urban Policy and Research*. 2017; 35(1):20-31. DOI: 10.1080/08111146.2016.1235032
22. Gaikova L.V. Development of the system of public services in modern native town-planning. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011. 7(54):33-40. (rus.).
23. Strashnova Y.G., Strashnova L.F., Zhukova T.I. Assessment of social facilities's urban development based on the integral rating of districts (case study of 25 districts of Moscow). *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(3):279-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.279-293 (rus.).

Received June 9, 2021.

Adopted in revised form on September 6, 2021.

Approved for publication on September 6, 2021.

B I O N O T E S: **Yulia G. Strashnova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Social Infrastructure Workshop; **State Autonomous Institution Research and Design Institute of the General Plan of the City of Moscow**; 2/14 2nd Brestskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; ustrashnova@genplanmos.ru;

Lyudmila F. Strashnova — PhD in Architecture, Senior Researcher, Head of the Social Infrastructure Workshop Sector; **State Autonomous Institution Research and Design Institute of the General Plan of the City of Moscow**; 2/14 2nd Brestskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; ustrashnova@genplanmos.ru.

Локальные изменения региональных систем расселения: условия возникновения, особенности, тенденции

Н.Г. Юшкова^{1,2}, Ю.В. Алексеев¹

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

² *Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Территориальное планирование является базовой компонентой градостроительной деятельности, способной обеспечить сбалансированное развитие систем населенных мест. Традиционные подходы предполагают полноту и точность оценки существующего состояния территории. Они слабо согласуются с новыми особенностями и тенденциями их организации на региональном уровне. Для совершенствования системы принятия градостроительных решений важно определять характеристики отмечаемых процессов и явлений, устанавливать причины их появления и прогнозировать последствия. Эти факторы определяют специфику изменений региональных систем.

Материалы и методы. Используются общедоступные данные: законодательные и нормативно-правовые акты, открытые картографические источники, документы территориального планирования субъектов РФ, материалы градостроительной проектной практики, опубликованные работы зарубежных и отечественных ученых. Для их обобщения и анализа применены системный анализ, методы теоретического моделирования, прототипирования.

Результаты. На основе систематизации новейшей градостроительной практики выявлены локальные изменения региональных систем как одной из ведущих тенденций. Они определяются социально-экономическими условиями. Влияние комплекса факторов вызывает особенности размещения локальных объектов на территории и выбор функциональных программ их развития. Исходя из классификации и анализа идентификационных признаков взаимодействия региональных систем расселения и объектов, разработана теоретическая модель их реорганизации.

Выводы. Формирование локальных урбанизированных образований в России происходит под влиянием глобальных тенденций регионализации. Они проявляются в поляризации пространства, избирательности проектного местоположения специальных объектов градостроительной деятельности, корреспондирующих всестороннему учету региональной специфики. Разрабатываются новые принципы градостроительного планирования в контексте принятых национальных стратегий, концепций и программ. Они сочетают в себе как максимальную устойчивость существующих систем населенных мест, так и их инноватизацию. Это позволяет в процессе реорганизации систем населенных мест достигать гарантированного повышения качества жизни и среды обитания человека.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: населенные места, региональные системы, локальные изменения, закономерности, урбанизированные образования, территориальное планирование, градостроительные решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юшкова Н.Г., Алексеев Ю.В. Локальные изменения региональных систем расселения: условия возникновения, особенности, тенденции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1152–1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1152-1167

Local changes in regional settlement systems: conditions, features, trends

Natalia G. Yushkova^{1,2}, Yuri V. Alekseev¹

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

² *Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Territorial planning is a basic component of urban planning activities that can ensure a balanced development of the systems of localities. Traditional approaches assume the completeness and accuracy of the assessment of the existing state of the territory. They are poorly consistent with the new features and trends of their organization at the regional level. To improve the system of making urban planning decisions, it is important to determine the characteristics of the observed processes and phenomena, to determine the causes of their occurrence and to predict the consequences. These factors determine the specifics of changes in regional systems.

Materials and methods. The study was conducted because of publicly available data: legislative and regulatory acts, open cartographic sources, documents of territorial planning of the subjects of the Russian Federation, materials of urban planning design practice, published works of foreign and domestic scientists. For their generalization and analysis, system analysis, methods of theoretical modeling, and prototyping were used.

Results. Based on the systematization of the latest urban planning practice, local changes in regional systems are identified as one of the leading trends. They are determined by socio-economic conditions. The influence of a complex of factors causes the peculiarities of the location of local objects on the territory and the choice of functional programs for their develop-

ment. Based on the classification and analysis of the identification features of the interaction of regional settlement systems and objects, a theoretical model of their reorganization is developed.

Conclusions. The formation of local urbanized formations in Russia is influenced by global trends of regionalization. They are manifested in the polarization of space, the selectivity of the design location of special objects of urban development activities, corresponding to a comprehensive account of regional specifics. New principles of urban planning are being formed in the context of the adopted national strategies, concepts and programs. They combine both the maximum stability of existing systems of localities and their innovatization. This makes it possible to achieve a guaranteed improvement in the quality of life and the human environment in the process of reorganizing the systems of populated places.

KEYWORDS: localities (populated places), regional systems, local changes, patterns, urbanized formations, territorial planning, urban planning solutions

FOR CITATION: Yushkova N.G., Alekseev Yu.V. Local changes in regional settlement systems: conditions, features, trends. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1152-1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1152-1167 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Действующая в Российской Федерации система разработки градостроительных решений базируется на основных положениях федерального закона — Градостроительного кодекса РФ. В этой системе определены виды градостроительной деятельности: территориальное планирование, градостроительное зонирование и планировка территории, а также представлена иерархия разрабатываемых профессиональных документов, предопределяющая процедуры их подготовки, согласования и утверждения [1–3]. Их содержание увязано с типологическим разнообразием градостроительных объектов, которые формируются преимущественно на трех основных уровнях организации пространства жизнедеятельности человека: субъекта федерации, муниципального образования и их фрагментов [4–7]. В качестве теоретической основы разработки проектных решений применительно ко всем без исключения объектам используется, как правило, принцип сохранения и повышения устойчивости сформированных систем расселения. Этот принцип градостроительства, обозначенный в начале XXI в., подтверждает свою актуальность уже многие годы [3, 6–9].

Положения концепции устойчивого развития пространственных систем не статичны, востребованы при обосновании градостроительных способов совершенствования среды жизнедеятельности в различных аспектах. Выделяются научные работы, обосновывающие целесообразность симбиотического подхода к изучению природно-техногенных систем и раскрывающие теоретические положения концепции биосферной совместимости [5, 10–13]. В современных градостроительных исследованиях предлагается учитывать результаты анализа внешних факторов, на основе которых устанавливаются требования к объектам градостроительной деятельности [14–16], системные принципы [17], контекстный аспект [18, 19], а также выявлять новые свойства и ценности сформированной среды жизнедеятельности, ее объектов и комплексов [20–25].

Региональный уровень разработки градостроительных решений вызывает особый интерес исследователей. Современная документация

по планированию развития территориальных систем расселения обязана разрабатываться на новой теоретической и методологической основе, непротиворечиво сочетать в себе градостроительные и социально-экономические решения [26, 27]. Эту необходимость подтверждают отмечаемыми постоянно изменениями в российском законодательстве. Относительно новым аспектом исследования является рассмотрение способов взаимодействия различных уровней градостроительной документации между собой, а также с отраслевыми видами документации аналогичных уровней. Так, каждое из возможных градостроительных решений не может быть сформировано в отрыве от содержания разработанных и утвержденных концепций и стратегий развития макрорегионов и субъектов Российской Федерации [25–28]. Система стратегического территориального планирования представлена форматами, в которых отчетливо проявляются идентификационные признаки тех или иных территорий [28–30]. Ее значимость подтверждена также градостроительной практикой [24, 27, 30].

В развитии известных теоретических подходов в градостроительстве все более широкое освещение получает анализ процессов реорганизации территориальных систем, вызванных влиянием инновационных факторов [14, 20, 30–32]. Их учет способствует формированию новых стандартов качества проживания на урбанизированных территориях [8, 12, 16]. В рамках данного подхода изучаются вопросы изменения процессов функционирования как региональных систем расселения в целом [25, 30–34], так и составляющих их отдельных объектов градостроительной деятельности [25–28].

Преобразование существующего состояния систем населенных мест сводится преимущественно к образованию типологий пространственных форм [25, 30–34]. В ряду подобных градостроительных явлений и процессов могут быть выделены локальные изменения региональных систем населенных мест [25, 30, 33].

За последнее десятилетие накоплен опыт реализации градостроительных решений по формированию локальных образований в различных регионах России. Он требует изучения и обобщения

ния с тем, чтобы совершенствовать процесс планирования развития территорий в его современном виде. В перспективе это скажется на организации процесса разработки градостроительных решений в целом и на их содержании. Предположительно, это способно обеспечить гармонизацию жизнедеятельности человека и его пространственного окружения посредством устранения противоречия между стремлением к сохранению их устойчивых признаков и приобретению градостроительными решениями качественно новых черт, соответствующих процессам общественного развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для установления эволюционных особенностей формирования особых экономических зон (ОЭЗ) как территорий с особыми режимами хозяйственной деятельности изучались действующие до настоящего времени в РФ законодательные акты. Это позволило выделить четыре основных функциональных типа ОЭЗ. Утвержденные для размещения и формирования ОЭЗ градостроительные ситуации в региональных системах населенных мест были систематизированы. Исследовались особенности процесса освоения, использования и реконструкции населенных мест, возникающего вследствие развития ОЭЗ как объектов градостроительной деятельности. Определялись общие и различительные признаки, ранжируемые по значимости для целей территориального планирования. Анализ градостроительной документации последних лет показал недостаточность учета тенденций локальных изменений региональных систем. Практика реализации проектов формирования ОЭЗ, напротив, отражает неравномерность процесса градостроительного освоения и использования территории. Сопоставление способов описания изменений в региональных системах позволило выделить новые характеристики и признаки. На их основе выявлены закономерности функционально-пространственной реорганизации региональных систем. При анализе и обобщении данных материалов применялись эмпирический анализ, системно-структурный анализ. С помощью метода графоаналитического моделирования были разработаны модельные схемы реорганизации региональных систем, установлены возможности их модификации. Они определяются степенью значимости локальных урбанизированных образований и их взаимосвязей с системой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение последних 10–12 лет в градостроительной практике РФ получает все большее распространение процесс разработки и реализации проектов развития территорий с преференциальными режимами хозяйственного использования.

Особые экономические зоны являются частным случаем территорий подобного типа [34–37]. Попытки их создания в отдельных российских регионах предпринимаются неоднократно, начиная с 1990 г.

Появлению в нашей стране ОЭЗ способствовало принятие соответствующих законодательных актов, и, прежде всего, федерального закона 2005 г.¹ [34]. То, что определенные территории получили соответствующий правовой статус ОЭЗ, означало начало действия регламентных принципов. Они распространились на сферы организации процесса разработки проектов и определения его содержания, установления рамок отношений заинтересованных сторон, обоснования выбора типа участков, его параметров, видов освоения или реконструкции, а также перспектив развития территории. Первоначальное целевое назначение ОЭЗ — системные преобразования субъектов РФ.

Действенность ОЭЗ в качестве эффективных инструментов управления территориями должна подтверждаться наличием строго определенных социально-экономических результатов — заданных показателей. В пользу целесообразности создания ОЭЗ в России свидетельствовал и мировой опыт реализации этих проектов. На основе его анализа стали разрабатываться российские варианты территориального развития регионов, ориентированные на создание ОЭЗ.

Активному переносу в российские условия лучших практик внедрения проектов ОЭЗ также способствовал исторически сложившийся характер формирования отечественной системы расселения с ее высокой дифференциацией; гипертрофированными физическими размерами; многообразием типологических форм освоения территорий как урбанизированных, так и не имеющих явных признаков хозяйственной освоенности [34]. Кроме того, в условиях нестабильности развития российских регионов реализация даже единичных проектов подобного рода представляется практически неразрешимой проблемой. А интенсивное освоение ограниченного количества фрагментов территории остается, по сути, единственной возможностью достижения планируемых показателей повышения качества среды жизнедеятельности населения [1, 3].

Проведенный анализ показал, что к настоящему времени более половины субъектов РФ являются участниками конкурсной процедуры на размещение на своей территории ОЭЗ. В течение всего рассматриваемого промежутка времени около 30 заявок на ОЭЗ были одобрены в Правительстве РФ и приобрели официальный статус. Систематизация процесса формирования ОЭЗ позволила выделить три характерных этапа (табл. 1–3).

¹ Об особых экономических зонах в Российской Федерации : Федеральный закон от 22.07.2005 № 116-ФЗ.

Табл. 1. Периодизация процесса формирования ОЭЗ в субъектах РФ (2005–2010 гг.)

Table 1. Periodization of the process of formation of special economic zones in the subjects of the Russian Federation (2005–2010)

Наименование исследуемых объектов градостроительной деятельности Name of the objects of urban planning activity	Характеристики размещения исследуемых объектов градостроительной деятельности федерального уровня Characteristics of location of the objects of urban planning activities at the federal level	
	Территория субъекта РФ Territory of the Russian Federation subject	Территории муниципальных образований Territory of the municipal entities
<i>Промышленно-производственные зоны</i> Industrial zones		
ОЭЗ «Липецк» SEZ “Lipetsk”	Липецкая область Lipetsk Region	Грязинский муниципальный район Gryazinsky Municipal District
ОЭЗ «Алабуга» SEZ “Alabuga”	Республика Татарстан Republic of Tatarstan	Городской округ Алабуга, Елабужский муниципальный район Urban District Alabuga, Elabuga Municipal District
ОЭЗ «Тольятти» SEZ “Togliatti”	Самарская область Samara Region	Городской округ Тольятти Urban District Togliatti
ОЭЗ «Титановая долина» SEZ “Titanium Valley”	Свердловская область Sverdlovsk Region	Городские округа: Екатеринбург, Верхнесалдинский, Сысертский Urban districts: Ekaterinburg, Verkhnesaldinskiy, Sysertskiy
<i>Технико-внедренческие зоны</i> Technology innovation zones		
ОЭЗ «Технополис Москва» SEZ “Technopolis Moscow”	Город федерального значения Москва Federal city of Moscow	
ОЭЗ «Санкт-Петербург» SEZ “St. Petersburg”	Город федерального значения Санкт- Петербург Federal city of Saint Petersburg	
ОЭЗ «Дубна» SEZ “Dubna”	Московская область Moscow Region	Городской округ Дубна Urban District Dubna
ОЭЗ «Томск» SEZ “Tomsk”	Томская область Tomsk Region	Городской округ Томск Urban District Tomsk
<i>Портовые зоны</i> Port zones		
ОЭЗ «Ульяновск» SEZ “Ulyanovsk”	Ульяновская область Ulyanovsk Region	
<i>Туристско-рекреационные зоны</i> Tourism and recreation zones		
ОЭЗ «Ворота Байкала» SEZ “Baikal Gate”	Иркутская область Irkutsk Region	Слюдянский муниципальный район Slyudyanka Municipal District
ОЭЗ «Бирюзовая Катунь» SEZ “Biryuzovaya Katun”	Алтайский край Altai Krai	Алтайский муниципальный район Altai Municipal District
ОЭЗ «Байкальская гавань» SEZ “Baikal Harbour”	Республика Бурятия Republic of Buryatia	Прибайкальский муниципальный район Pribaikalsky Municipal District

За прошедшие 15 лет известны многочислен-
ные редакции принятого в 2005 г. федераль-
ного закона. Они оказали влияние на изменение
методических подходов к процессу разработки
проектов ОЭЗ, а также их последующей реализа-
ции. В то же время многие правовые положения
действующих законодательных актов, косвенно
затрагивающих эти вопросы, также повлияли
на содержание процедур создания ОЭЗ. Речь идет,
прежде всего, о требованиях по установлению

достаточно жестких рамок определения функци-
ональной специализации осваиваемых террито-
рий. Однако перечень потенциально возможных
функциональных типов ОЭЗ остается неизмен-
ным (промышленно-производственные, техни-
ко-внедренческие, портовые и туристско-рекре-
ационные). Важно понимать, что «назначение»
функциональной специализации ОЭЗ осущест-
влялось на основе принципа «де-юре» и чаще
всего не являлось прямым следствием процес-

Табл. 2. Периодизация процесса формирования ОЭЗ в субъектах РФ (2011–2016 гг.)

Table 2. Periodization of the process of formation of special economic zones in the subjects of the Russian Federation (2011–2016)

Наименование исследуемых объектов градостроительной деятельности Name of the objects of urban planning activity	Характеристики размещения исследуемых объектов градостроительной деятельности федерального уровня Characteristics of location of the objects of urban planning activities at the federal level	
	Территория субъекта РФ Territory of the Russian Federation subject	Территории муниципальных образований Territory of the municipal entities
<i>Промыленно-производственные зоны Industrial zones</i>		
ОЭЗ «Моглино» SEZ “Mogolino”	Псковская область Pskov Oblast	Псковский муниципальный район Pskov Municipal District
ОЭЗ «Ступино Квадрат» SEZ “Stupino Kvadrat”	Московская область Moscow Region	Ступинский муниципальный район Stupino Municipal District
ОЭЗ «Калуга» SEZ “Kaluga”	Калужская область Kaluga region	Людиновский муниципальный район Lyudinovsky Municipal District
ОЭЗ «Узловая» SEZ “Uzlovaya”	Тульская область Tula region	Узловский муниципальный район Uzlovsky Municipal District
ОЭЗ «Лотос» SEZ “Lotos”	Астраханская область Astrakhan region	Наримановский муниципальный район Narimanov Municipal District
<i>Технико-внедренческие зоны Technology innovation zones</i>		
ОЭЗ «Исток» SEZ “Istok”	Московская область Moscow Region	Городской округ Фрязино Municipal district Fryazino
ОЭЗ «Иннополис» SEZ “Innopolis”	Республика Татарстан Republic of Tatarstan	Верхнеуслонский, Лаишевский муниципальные районы Verkhneuslonsky, Laishevsky Municipal Districts
<i>Туристско-рекреационные зоны Tourism and recreation zones</i>		
ОЭЗ «Завидово» SEZ “Zavidovo”	Тверская область Tver Region	Конаковский муниципальный район Konakovo Municipal District
ОЭЗ «Архыз» SEZ “Arkhyz”	Карачаево-Черкесская Республика Karachay-Cherkess Republic	Зеленчукский муниципальный район Zelenchuksky Municipal District
ОЭЗ «Эльбрус» SEZ “Elbrus”	Кабардино-Балкарская Республика Kabardino-Balkarian Republic	Эльбрусский, Черекский, Чегемский муниципальные районы Elbrus, Cherek, Chegem Municipal Districts
ОЭЗ «Армхи» SEZ “Armghi”	Республика Ингушетия Republic of Ingushetia	Джейрахский, Сунженский муниципальные районы Jeyrkhakhsky, Sunzhensky Municipal Districts
ОЭЗ «Цори» SEZ “Tsori”	Республика Ингушетия Republic of Ingushetia	Джейрахский, Сунженский муниципальные районы Jeyrkhakhsky and Sunzhensky Municipal Districts
ОЭЗ «Матлас» SEZ “Matlas”	Республика Дагестан Republic of Dagestan	Хунзахский муниципальный район Khunzakh Municipal District
ОЭЗ «Ведучи» SEZ “Veduchi”	Чеченская Республика Chechen Republic	Итум-Калинский муниципальный район Itum-Kalinsky Municipality District

сов эволюционного развития соответствующих территорий. Это вызывает противоречия между сложившимися закономерностями формирования региональных систем населенных мест и вновь образованными пространственными формами. Из этого вытекает необходимость выявления роли градостроительных факторов, выступающих ката-

лизаторами процесса функционально-пространственного обновления освоенных территорий.

С самого начала процесса создания ОЭЗ выбор их конкретного типа в субъектах РФ предельно формализован: для сохранения полученного однажды правового статуса требуется его ежегодное подтверждение в виде конкретных результатов хозяйственной

Табл. 3. Периодизация процесса формирования особых экономических зон в субъектах Российской Федерации (2018–2020 гг.)

Table 3. Periodization of the special economic zones formation process in the constituent entities of the Russian Federation (2018–2020)

Наименование исследуемых объектов градостроительной деятельности Name of the objects of urban planning activity	Характеристики размещения исследуемых объектов градостроительной деятельности федерального уровня Characteristics of location of the objects of urban planning activities at the federal level	
	Территория субъекта РФ Territory of the Russian Federation subject	Территории муниципальных образований Territory of the municipal entities
<i>Промыленно-производственные зоны Industrial zones</i>		
ОЭЗ «Кашира» SEZ “Kashira”	Московская область Moscow Oblast	Городской округ Кашира Urban District Kashira
ОЭЗ «Максимиха» SEZ “Maksimikha”	Московская область Moscow Region	Городской округ Домодедово Urban District Domodedovo
ОЭЗ «Доброград-1» SEZ “Dobrograd-1”	Владимирская область Vladimir region	Ковровский муниципальный район Kovrovsky Municipal District
ОЭЗ «Центр» SEZ “Centre”	Воронежская область Voronezh Region	Новоусманский муниципальный район Novousman Municipal District
ОЭЗ «Орел» SEZ “Orel”	Орловская область Orel Region	Мценский муниципальный район Mtsensky Municipal District
ОЭЗ «Кулибин» SEZ “Kulibin”	Нижегородская область Nizhny Novgorod Region	Городской округ город Дзержинск Dzerzhinsk Municipal District
ОЭЗ «Алга» SEZ “Alga”	Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	Ишимбайский, Стерлитамакский муниципальные районы Ishimbaysky, Sterlitamaksky Municipal District
ОЭЗ «Грозный» SEZ “Grozny”	Чеченская Республика Chechen Republic	Городской округ Грозный Municipal district Grozny
ОЭЗ «Авангард» SEZ “Avangard”	Омская область Omsk region	Городской округ Омск Urban District Omsk
ОЭЗ «Красноярская технологическая долина» SEZ “Krasnoyarsk Technological Valley”	Красноярский край Krasnoyarsk region	Городской округ Красноярск Urban District Krasnoyarsk
<i>Технико-внедренческие зоны Technology innovation zones</i>		
ОЭЗ «Саратов» SEZ “Saratov”	Саратовская область Saratov region	Городской округ Саратов, Энгельский, Балаковский муниципальные районы Urban District Saratov, Engelskiy and Balakovskiy Municipal Districts
<i>Портовые зоны Port zones</i>		
ОЭЗ «Оля» SEZ “Olya”	Астраханская область Astrakhan Oblast	
<i>Туристско-рекреационные зоны Tourism and recreation zones</i>		
ОЭЗ «Мамисон» SEZ “Mamison”	Республика Северная Осетия – Алания Republic of North Ossetia-Alania	Алагирский муниципальный район Alagirsky municipal district

деятельности. Неполное соответствие имеющихся результатов заданным показателям развития практически всегда служит причиной ликвидации ОЭЗ посредством прекращения действия преференциального режима хозяйствования, как, например в ОЭЗ Гранд Спа Юца в Ставропольском крае (рис. 1, а).

Дальнейшее исследование касалось установления зависимости между местоположением ОЭЗ в границах отдельных субъектов РФ и функциональным типом в рамках выделенных этапов их формирования.

Как показал проведенный анализ, на первом этапе формирования ОЭЗ (2005–2010 гг.) при вы-

боре регионов-представителей руководствовались в большей степени общей социально-экономической ситуацией в стране, чем реально имеющимися в регионах предпосылками. На эти годы приходится разработка и утверждение важных стратегических документов, определяющих развитие регионов в увязке с национальными приоритетами. В них проявлены идеи создания ОЭЗ как одного из наиболее эффективных инструментов опережающего развития². Первые проекты ОЭЗ разрабатывались для: городов федерального значения Москвы и Санкт-Петербурга, Московской и Томской областей (ОЭЗ технико-внедренческого типа); Республики Татарстан, Самарской, Свердловской и Липецкой областей (ОЭЗ промышленно-производственного типа); регионов Сибирского федерального округа — Иркутской области, Алтайского края и Республики Бурятия (ОЭЗ туристско-рекреационного типа). На этом этапе не предполагалась качественная и количественная оценка градостроительных факторов формирования ОЭЗ.

На втором этапе (2011–2016 гг.) формирование ОЭЗ осуществляется преимущественно в рамках «регионального подхода». Данный этап совпал по времени с принятием Стратегии регионального развития^{3, 4}, в которой обосновано уровневое ранжирование территорий субъектов федерации, масштабирование — выделение отдельных территориальных зон различной величины, виды направлений их пространственного развития, требования учета региональной идентичности. В частности, выделяются Центральный и Северо-Кавказский федеральные округа. Отличие первого примера заключается в том, что на территории субъектов, входящих в его состав, предложено к размещению максимальное количество ОЭЗ. Это — ОЭЗ промышленно-производственного и технико-внедренческого типов в Московской, Калужской и Тульской областях, а также ОЭЗ туристско-рекреационного типа в Тверской области. Для второго примера характерно наличие планов, касающихся целенаправленного развития ОЭЗ туристско-рекреационного типа в Карачаево-Черкесской, Кабардино-Балкарской, Ингушской, Дагестанской, Чеченской республиках. Для многих из предполагавшихся к созданию ОЭЗ на этом этапе и ранее сохранение полученного правового статуса стало проблематичным в связи с утверждением на федеральном уровне критериев оценки их эффек-

тивности, включающих также градостроительные факторы.

Третий этап создания ОЭЗ имеет особенности (2018–2020 гг.). Проектные свойства ОЭЗ, создаваемых на этом этапе, являются прямым следствием концептуальных положений Стратегии пространственного развития Российской Федерации⁵, оказавшей влияние на многие сферы общественного развития. Одним из важных завоеваний стратегии стало то, что обозначенные в ней приоритеты показаны как основополагающие при принятии решений об изменении существующей системы населенных мест, не исключая создания новых ОЭЗ. Тем самым ОЭЗ понимается как средство укрепления стратегического значения территорий, их концентрации в границах федеральных округов. При этом большое значение для развития регионов приобретают: выявление собственных источников, их оценка и обоснование оптимальных вариантов использования. В частности, получают дальнейшее развитие территории в регионах Центрального федерального округа. В Московской, Владимирской, Орловской и Воронежской областях реализуются проекты создания ОЭЗ промышленно-производственного типа. В Приволжском федеральном округе, наряду с территориями Республики Татарстан, Самарской и Ульяновской областями, осваиваются земельные участки в Нижегородской области и Республике Башкортостан под ОЭЗ промышленно-производственного типа, а также в Саратовской области под ОЭЗ технико-внедренческого типа. С декабря 2020 г. перечень уже реализованных проектов ОЭЗ в Сибирском федеральном округе дополнен новыми проектами ОЭЗ промышленно-производственного типа в Омской области и Красноярском крае. Таким образом, на современном этапе при формировании ОЭЗ в субъектах РФ реализуются оба вышеназванных подхода, что обеспечивает сведение к минимуму противоречия территориальных интересов федерального, регионального и муниципального уровней. Соответственно, при разработке проектов развития ОЭЗ анализ реальной готовности региональных систем к появлению особых экономических зон должен осуществляться на паритетной основе, по принципу «обратной связи». Это позволяет определять параметры функционирования ОЭЗ и их оптимальное соотношение. В этом случае осуществление комплексной оценки градостроительных факторов уже нельзя рассматривать как дополнительное стимулирующее условие успешной реализации проектов ОЭЗ. Данный вид оценки становится первоочередной процедурой, обосновывающей различные аспекты выбора ме-

² Концепция Стратегии социально-экономического развития регионов РФ : проект Мин-ва регион. развития РФ. 2005.

³ Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р.

⁴ Концепция совершенствования региональной политики в Российской Федерации : проект Мин-ва регион. развития РФ. 2010.

⁵ Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 207-р.

стоположения ОЭЗ как специальных объектов градостроительной деятельности [30, 34].

Детальный анализ процесса поэтапного формирования ОЭЗ в субъектах РФ дал возможность выявить наличие характерной градостроительной тенденции — локальных изменений региональных систем населенных мест (рис. 1). До настоящего времени создание ОЭЗ по-прежнему происходит стихийно. Действующее законодательство исключает подобные действия. Обоснование необходимости таких важных для развития регионов стратегических инициатив должно корреспондировать общим принципам пространственного развития территорий. Они должны закрепляться в положениях документов стратегического планирования регионального уровня (стратегиях социально-экономического развития и схемах территориального планирования) и согласовываться с ними.

Для целенаправленной организации профессиональных градостроительных действий по планированию изменений состояния региональных систем населенных мест требуется дифференцировать потенциально возможные виды их реорганизации, учитывающие влияние локальных урбанизированных образований, выделяя фрагментарные (рис. 1, *a, b*), островные (рис. 1, *c*) и сетевые (рис. 1, *d, e*) виды. Определение особенностей локальных изменений региональных систем позволило выявить тенденции, раскрывающие природу протекания этих процессов, как в частном, так и в генерализованном виде.

В рамках работы усовершенствованы приемы пространственного анализа. Это позволило обобщить материалы выборки картографических источников и выделить базовые характеристики исследуемых объектов градостроительной деятельности — ОЭЗ с учетом их функциональной специализации. Использование в работе метода прототипирования (проектирования по прототипам) было вызвано следующими обстоятельствами. Объектами градостроительной деятельности являются реально существующие региональные системы населенных мест, а также их фрагменты различной типологии и величины. Это понятие применяется в градостроительной практике и раскрывает сущность ее результатов. Для осуществления теоретического моделирования процессов необходимо оперировать терминами из этой сферы. Так, термин «территориальные (региональные) системы расселения» достаточно широко используется в качестве теоретического понятия. Во взаимосвязи с ним и в продолжение структурной логики функционирования системы принято применять такие понятия, как «элементы», «связи», «центры» и т.п. Для того чтобы теоретическая модель могла быть использована в методологии разработки градостроительных решений с минимальными погрешностями, предложено добиться максимально-

го корреспондирования обоих видов систем и их составляющих. Важно понимать, что разрабатываемая теоретическая модель региональной системы имеет определенную степень допущений и обобщений, а значит, не является полным аналогом реальной системы.

Сущность процесса градостроительного формирования территорий с преференциальными режимами в региональных системах расселения заключается в необходимости обеспечения их бесконфликтного взаимодействия и возможности поступательного развития. В разработанной модели известные виды элементов представлены в их обновленной функциональной программе (рис. 2). Модель также дополнена новыми составляющими. В частности, речь идет о локальных урбанизированных образованиях (ЛУО), влияние которых на региональную систему теоретически обосновано [34].

Поскольку территориальные системы не статичны, наличие базового набора определенных характеристик способно видоизменяться. Динамика процессов изменения состояний региональных систем в моделях их реорганизации может быть описана, как минимум, в двух основных пространственных срезах:

- формирования функционально-пространственных взаимосвязей элементов (рис. 3);
- определения степени значимости ЛУО (рис. 4).

В процессе теоретического моделирования изменения состояния региональных систем было установлено, что формирующаяся система связей выражает отношения между элементами системы (рис. 3). Сложность их построения связана с тем, что новые и существующие отношения соотносятся по-разному: как основные, как дополняющие, как вспомогательные. Вследствие этого изменяются выходные градостроительные параметры функционирования системы. Образующим комбинациям связей элементов соответствует определенная конфигурация территориальной системы.

Таким образом, в результате теоретического моделирования получены функционально-пространственные модели на основе четырех типов реорганизации региональных систем, использующие различные схемы связей элементов. Для разработанных моделей характерна последующая интенсификация градостроительного освоения территорий в зоне влияния каждого из пространственных элементов: центрального, его ядра, срединного или периферического.

Осуществление теоретического моделирования региональных систем позволило также установить, что в основе происходящих в них изменений заложено определение роли ЛУО. Именно их величина, плотность размещения, степень концентрации в пространстве, удаленность от прочих элементов системы обуславливают формирование способов их отношений (рис. 4).

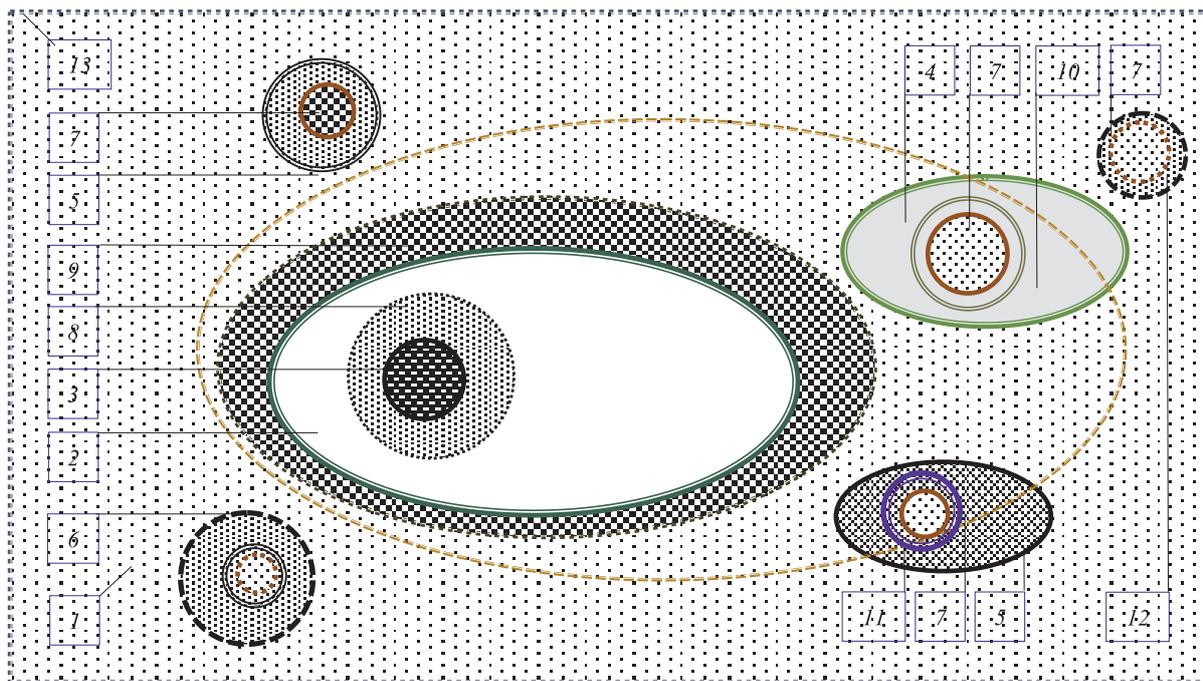


Рис. 2. Функционально-пространственная модель региональной системы расселения: 1 — региональная система расселения (РСП); 2 — центральный элемент РСП; 3 — ядро центрального элемента РСП; 4 — срединные элементы РСП; 5, 6 — периферические элементы РСП с выявленным потенциалом градостроительного развития, с латентным потенциалом градостроительного развития; 7 — локальные урбанизированные образования; 8–10 — территории высокой интенсивности градостроительного освоения в зоне влияния ядра центрального элемента РСП, центрального элемента РСП, срединных элементов РСП; 11, 12 — территории перспективного развития в зоне влияния локальных урбанизированных образований (с установленными видами функционального использования, с вариантными видами функционального использования); 13 — граница РГС (рис. авторов)

Fig. 2. Functional-spatial model of the regional settlement system: 1 — regional settlement system (RSC); 2 — central element of RSC; 3 — core of the central element of RSC; 4 — median elements of RSC; 5, 6 — peripheral elements of RSC with identified potential of urban development, with latent potential of urban development; 7 — local urbanized formations; 8–10 — territory of high intensity of urban development in the zone of influence of the core of the central element of DDS; central element of DDS; median elements of DDS; 11, 12 — territory of perspective development in the zone of influence of local urban formations (with identified types of functional use, with alternative types of functional use); 13 — boundary of RHS (authors' fig.)

Локальные урбанизированные образования, возникая на неосвоенных пространствах, становятся мощным стимулом не только к фрагментарной модернизации существующего состояния территории, но и импульсом трансформации региональных систем в целом. В случае множественных образований в системах подобные эффекты усиливаются. На основе данной взаимосвязи формируются ареалы градостроительной активности, на величину которых оказывают влияние установленные между элементами связи. Из-за того, что связи находятся в динамике, их интенсивность также не постоянна и корректируется. В зависимости от используемой схемы реорганизации региональных систем выбираются способы ее инфраструктурного обеспечения, и определяется его функционально-пространственное наполнение.

Модель реорганизации региональных систем, разработанная с использованием метода прототипирования, целесообразно внедрять в систему разработки градостроительных решений. Очевидно, что

обоснование перспектив развития региональных систем населенных мест осуществляется в рамках территориального планирования, конкретно, его уровня, соотносящегося с субъектами федерации. Градостроительные документы, в которых содержатся положения о территориальном планировании применительно к этому уровню, — схемы территориального планирования. До настоящего времени сохраняется актуальность их сопоставления ввиду отсутствия единых методологических подходов к их разработке. Из-за этого разработчики схем ограничиваются формальными требованиями. Но этого недостаточно. Ситуация еще в большей степени усложняется по причине того, что, начиная с 2014 г., территориальное планирование стало элементом системы стратегического планирования, сохранив при этом основную сферу применения — градостроительную деятельность. Подобная двойственность решения задач также требует поиска оптимальных решений [30].

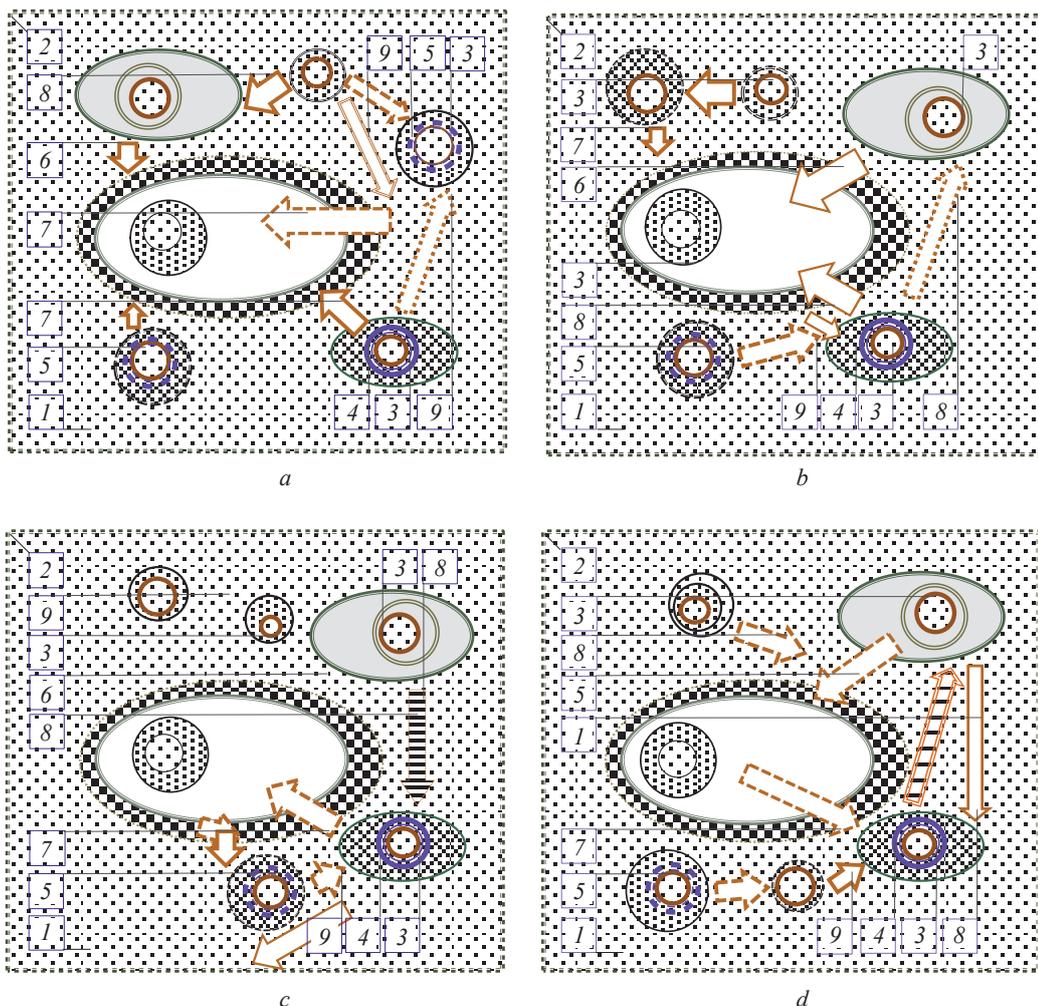


Рис. 3. Формирование функционально-пространственных взаимосвязей элементов в моделях реорганизации региональных систем расселения на основе приоритетов: центрально-срединного развития (а); центрально-периферического развития (b); срединно-периферического развития (c); периферического развития (d); 1 — РСР; 2 — граница РГС; 3 — ЛУО; 4, 5 — территории перспективного развития в зоне влияния ЛУО с установленными видами функционального использования, вариантами видами функционального использования; 6–9 — функционально-пространственные связи (центрально-срединные, центрально-периферические, срединно-периферические, периферические) (рис. авторов)

Fig. 3. Formation of functional-spatial interrelationships of elements in models of reorganization of regional systems of settlement based on: priorities of central-medium development (a); priorities of central-peripheral development (b); priorities of median-peripheral development (c); priorities of peripheral development (d); 1 — regional settlement system (RSC); 2 — border of RSC; 3 — local urbanized formations; 4, 5 — territories of perspective development in a zone of influence of local urbanized formations with the determined types of functional use, with alternative types of functional use; 6–9 — functional-spatial communications (central-median, central-peripheral, median-peripheral, peripheral), (authors' fig.)

Разработанная теоретическая модель реорганизации региональных систем расселения понимается авторами как эталонная форма отражения потенциально возможных изменений, возникающих вследствие воздействия как внешних, так и внутренних факторов. Региональная специфика, выявляемая в процессе изучения свойств и признаков конкретных систем населенных мест, преломляет ее базовые характеристики. Однако общая пространственная организация и взаимосвязи элементов сохраняются. Это дает возможность организовать процесс моделирования изменений региональной системы на основе единых стандартов, что позво-

лит повысить его управляемость [3, 27]. Это справедливо также и для случаев, когда отмечаются существенные отклонения, характеризующие высокую изменчивость территориальных объектов, они позволяют разрабатывать универсальные модели описания нестандартных градостроительных явлений. Стандартизация способов информационного описания и представления изменяющихся состояний территориальной системы даст возможность соизмерять содержание документов территориального планирования, преодолевая их чрезмерную персонификацию, тем самым повышая результатив-

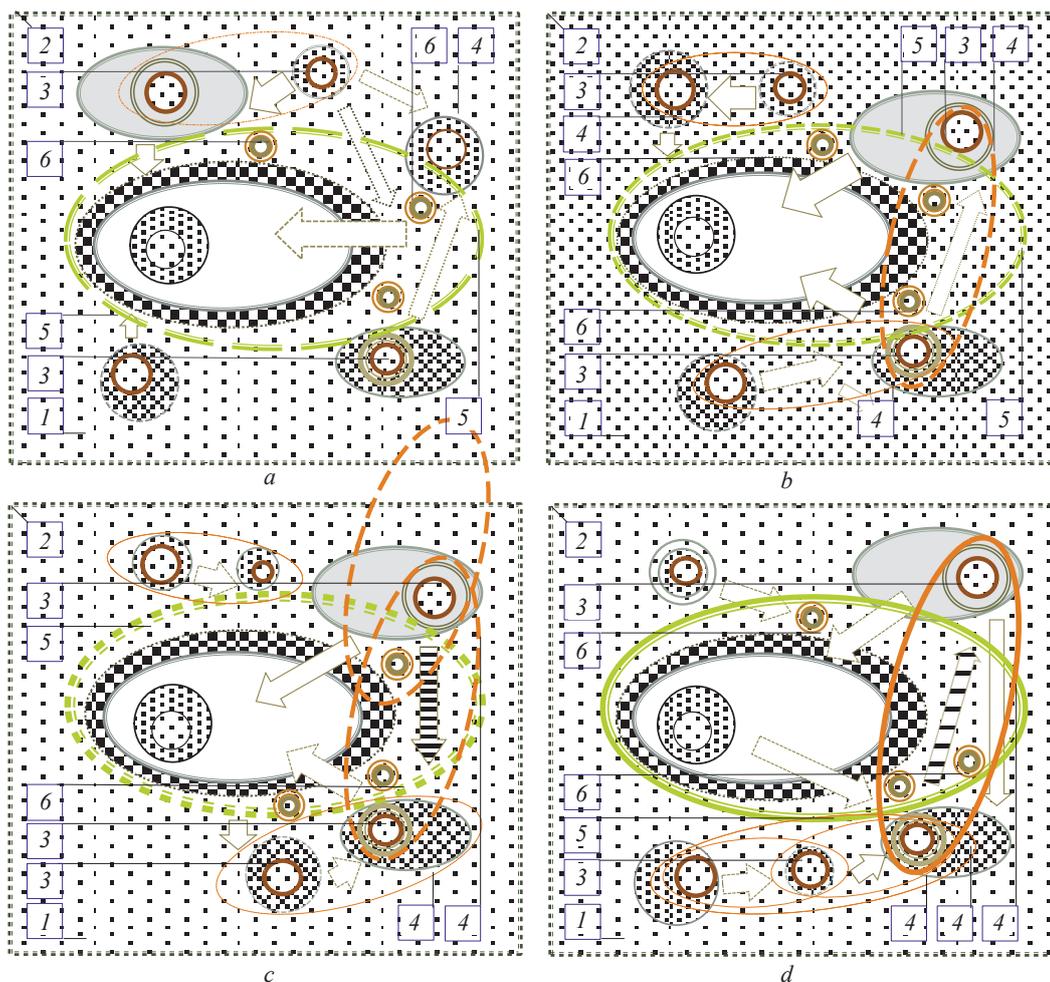


Рис. 4. Выявление степени значимости локальных урбанизированных образований в моделях реорганизации региональных систем расселения: с сохранением центростремительных тенденций (*a*); с одновременным проявлением центростремительных и центробежных тенденций (*b*, *c*); с прогнозированием центробежных тенденций (*d*): 1 — РСР; 2 — граница РГС; 3 — ЛУО; 4 — прогнозируемые ареалы градостроительных изменений РСР; 5 — приоритетные способы реорганизации инфраструктурного обеспечения РСР; 6 — формируемые элементы инфраструктурного обеспечения взаимодействия РГС и ЛУО (рис. авторов)

Fig. 4. Revealing the degree of significance of local urbanized formations in the models of reorganization of regional settlement systems with preservation of centripetal trends (*a*); with simultaneous manifestation of centripetal and centrifugal trends (*b*, *c*); with prediction of centrifugal trends (*d*): 1 — regional settlement system (RSC); 2 — RSC boundary; 3 — local urbanized formations (LUO); 4 — forecasted areas of urban development changes in RSC; 5 — priority ways of reorganization of infrastructure provision of RSC; 6 — forming elements of infrastructure provision of RSC and LUO interaction, (authors' fig.)

ность градостроительной деятельности практически во всех регионах России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что одной из ведущих градостроительных тенденций последних лет в регионах Российской Федерации является появление локальных трансформаций. Среди многообразия причин, способных их вызывать, особую роль играют институциональные факторы, в частности, активно развивающаяся практика разработки законодательных актов. Необходимость реализации их правовых положений связана в том числе с поиском специальных градо-

строительных средств. Особые экономические зоны выделяются среди таких средств. Требования к их формированию обуславливают развитие территорий регионов по локальному типу, при этом вызывают изменения существующего состояния населенных мест. Систематизация новейшей российской практики реализации проектов формирования территорий локального типа позволила выделить характерные этапы, различающиеся между собой базовыми условиями формирования исследуемых объектов градостроительной деятельности и результирующими формами учета градостроительных факторов. Как результат этого этапа анализа, определены преимущественные типологические схемы локальных из-

менений региональных систем населенных мест — фрагментарные, островные и сетевые, являющиеся основой их реорганизации и появления новых перспективных градостроительных форм.

Посредством выявления региональных особенностей и тенденций, характеризующих локальные изменения, установлено наличие особого класса объектов градостроительной деятельности, являющихся прототипами ЛУО. ЛУО представляют собой ведущий элемент региональной системы расселения, обеспечивающий функционально-пространственный вариант реорганизации. В современных условиях он способен выполнять адаптационную функцию, посредством него возможно осуществление регулирующих воздействий на системы расселения. Это способствует предотвращению возникновения ее критических состояний и достижению ими сбалансированного функционирования. Установленная зависимость параметров функционирования региональных систем от степени активности ЛУО положена в основу разработки теоретической модели их реорганизации.

Разработанная теоретическая модель территориальной системы имитирует отношения образующих ее элементов в различных условиях. Ее

использование в градостроительной деятельности способно существенно повысить ее результативность, прежде всего, за счет прогнозирования последствий локальных изменений в сложившейся структуре населенных мест. При условии непрерывности этого процесса совершенствуется действующая система разработки градостроительных решений и территориальное планирование как ее основного звена. Уточнение предмета градостроительной деятельности — планируемых изменений региональной системы позволяет непротиворечиво сосуществовать документам территориального и социально-экономического планирования, образующим комплекс пространственно-стратегических решений. Характерным отличительным признаком населенных мест является региональная идентичность. В рамках представленного концептуального подхода это свойство раскрывается в комплексе количественных и качественных показателей изменений региональной системы. На этой основе формируются новые методологии управления территориями субъектов РФ, аккумулирующих в себе современные технологии, средства и инструментарий планирования изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Ю.В. Подход к оценке эволюции научных проблем в системе управления градостроительной деятельностью // *Архитектура и строительство России*. 2019. № 4 (232). С. 16–21.
2. Герцберг Л.Я. Действующий градостроительный кодекс РФ и основные направления его совершенствования // *Academia*. Архитектура и строительство. 2015. № 3. С. 97–100.
3. Донцов Д.Г., Юшкова Н.Г. Градостроительное регулирование рационального использования территории. Волгоград : ВолГАСУ, 2007. 184 с.
4. Soltys J. Settlement networks in polish spatial development regional plans // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245. P. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/245/4/042083
5. Бакаева Н.В., Черняева И.В. Функции биосферосовместимого города и их доступность человеку // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2016. № 3 (15). С. 64–73.
6. Dontsov D.G., Yushkova N.G. Principles of sustainable development of the territory and priorities of architectural and urban construction activity // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1800. Issue 1. P. 050011. DOI: 10.1063/1.4973071
7. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12
8. Митягин С.Д. Градостроительная база устойчивого развития урбанизированных территорий // *Градостроительство*. 2016. № 2 (42). С. 72–75.
9. Shcherbina E., Gorbenkova E. Smart city technologies for sustainable rural development // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 022039. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022039
10. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциал. М. : Издательство АСВ, 2019. 208 с.
11. Бакаева Н.В., Чайковская Л.В., Кормина А.А. Градоустройство как комплексная деятельность по созданию социально-ориентированной городской среды // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 1 (25). С. 94–106. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106
12. Бакаева Н.В., Черняева И.В. К задачам нормирования комфортности и безопасности среды жизнедеятельности города // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 1 (87). С. 101–112. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-101-112
13. Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю. К вопросу поиска сбалансированного сосуществования природных и урбанизированных территорий // *Биосферная совместимость: человек, регион, техноло-*

- гии. 2019. № 3 (27). С. 3–16. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-27-3-3-16
14. *Shubentsov M.V., Mityagin S.D., Gaevskaya Z.A.* The sixth technological revolution in construction industry: Noospheric paths // *Advances in Energy and Environment Research*. 2017. Pp. 129–134. DOI: 10.1201/9781315212876-27
15. *Кабанов В.Н., Донцов Д.Г., Юшкова Н.Г., Михайлова Е.В.* Пространственно-стратегическое развитие территории. Волгоград : Волгоградский государственный аграрный университет, 2018. 276 с.
16. *Мусеев Ю.М.* Нарращивание потенциала управления пространственным развитием урбанизированных территорий // *Экология урбанизированных территорий*. 2012. № 3. С. 13–22.
17. *Yenin A.E., Liventceva A.V.* System approach in urban planning. History. General foundations. Objects of system researches // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017. № 1 (33). Pp. 91–101.
18. *Украинский В.Н.* Формирование систем регионального развития: зарубежный опыт // *Регионалистика*. 2018. Т. 5. № 1. С. 31–40. DOI: 10.14530/reg.2018.1.31
19. *Smilka V.A.* Detection of reflexive signs in town planning systems of Ukraine and Republic of Belarus // *Science & Technique*. 2018. Vol. 17. Issue 2. Pp. 123–129. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-123-129
20. *Telichenko V.I., Benuzh A.A.* Evaluation of Russia's innovation activity levels in construction // *Civil Engineering and Urban Planning IV*. 2015. Pp. 677–680. DOI: 10.1201/b19880-128
21. *Moulaert F., Sekia F.* Territorial innovation models: a critical survey // *Regional Studies*. 2003. Vol. 37 (3). Pp. 289–302. DOI: 10.1080/0034340032000065442
22. *Jabareen Y.* Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk // *Cities*. 2013. Vol. 31. Pp. 220–229. DOI: 10.1016/j.cities.2012.05.004
23. *Yushkova N.G., Gushchina E.G., Gaponenko Yu.V., Dontsov D.G., Gushchin M.S.* Infrastructural priorities and regularities of spatial development of regional systems // *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences*. 2019. Pp. 474–483. DOI: 10.15405/epsbs.2019.04.51
24. *Алексеев Ю.А.* Подход к организации и формированию новой системы и структуры нормативно-технических документов для освоения подземного пространства // *Градостроительство*. 2012. № 5 (21). С. 68–74.
25. *Перекопская М.А., Алексеев Ю.В.* Организация территорий с развитым лесопромышленным комплексом (на примере Швеции и России) // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 9. С. 1228–1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238
26. *Kamrowska-Zaluska D., Obracht-Prondzyńska H.* Urban regeneration in urban functional areas in Poland as an instrument of implementation of the EU Cohesion Policy // *Growth and Change*. 2020. Vol. 51. Issue 1. Pp. 278–301. DOI: 10.1111/grow.12361
27. *Юшкова Н.Г.* Совершенствование инструментального обеспечения пространственного подхода к региональному планированию: проблемы, особенности, тенденции // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2014. Т. 6. № 36. С. 225–242. DOI: 10.15838/esc/2014.6.36.17
28. *Michalka L., Kovac B.* A new tool of urban stability and development in spatial planning // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. P. 092046. DOI: 10.1088/1757-899X/471/9/092046
29. *Швецов А.Н., Демьяненко А.Н., Украинский В.Н.* Деструктивные стереотипы российского стратегического планирования и их возможные последствия для практики регионального стратегирования (часть 1) // *Регионалистика*. 2016. Т. 3. № 3. С. 48–60.
30. *Yushkova N.* Restructuring of regional long-term planning principles: adaptation or strategic choice // *Technology audit and production reserves*. 2014. Vol. 4. Issue 2 (18). P. 44. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.26398
31. *Kolyasnikov V.A.* Strategy of spatial development in urban planning Russia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 962. P. 032033. DOI: 10.1088/1757-899X/962/3/032033
32. *Yushkova N.G., Gushchina E.G., Dontsov D.G., Fikhtner O.A.* Spatial development dichotomy: assessment of the potential and implementation of territorial systems // *The European Proceedings of Social & Behavioral Sciences*. 2019. Vol. 77. Pp. 792–803. DOI: 10.15405/epsbs.2019.12.05.97
33. *Zeković S., Vujošević M., Maričić M.* Spatial regularization, planning instruments and urban land market in a post-socialist society: The case of Belgrade // *Habitat International*. 2015. Vol. 48. Pp. 65–78. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.03.010
34. *Yushkova N.G.* Local urban-planning formations as a foundation for reorganizing regional systems of settlement: prerequisites for developing the methodology // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. Issue 3 (47). Pp. 76–90. DOI: 10.36622/vstu.2020.47.3.007
35. *Wang J.* The economic impact of special economic zones: evidence from chinese municipalities // *Journal of Development Economics*. 2013. Vol. 101. Pp. 133–147. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2012.10.009
36. *Grabovij P.* Reconstruction and modernization of industrial parks // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. P. 08028. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108028
37. *Leonov S.N.* Preferential regimes of established local growth points and its impact on the economy of the Far East // *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2020. Vol. 13. Issue 3. Pp. 28–45. DOI: 10.15838/esc.2020.3.69.3

Поступила в редакцию 11 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 17 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Геннадиевна Юшкова** — кандидат архитектуры, доцент, советник РААСН, докторант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; доцент кафедры экологического строительства и городского хозяйства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 513635, Scopus: 57193128174, ResearcherID: AAR-1414-2021, ORCID: 0000-0001-8845-9585; ng_yushkova-v@mail.ru;

Юрий Владимирович Алексеев — доктор архитектуры, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 690296; alekseev-grado@yandex.ru.

REFERENCES

1. Alekseev Yu.V. Approach to evaluation of scientific evolution problems in the urban management system. *Architecture and Construction of Russia*. 2019; 4(232):16-21. (rus.).
2. Gertsberg L.Ya. The valid regional and town-planning code of the Russian Federation and main directions of its improvement. *Academia. Architecture and construction*. 2015; 3:97-100. (rus.).
3. Dontsov D.G., Yushkova N.G. *Urban planning of rational use of territory*. Volgograd, VolGASU, 2007; 184. (rus.).
4. Sołtys J. Settlement networks in polish spatial development regional plans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 245:042083. DOI: 10.1088/1757-899X/245/4/042083
5. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Function biosphericcompatibility city and their availability to person. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2016; 3(15):64-73. (rus.).
6. Dontsov D.G., Yushkova N.G. Principles of sustainable development of the territory and priorities of architectural and urban construction activity. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1800(1):050011. DOI: 10.1063/1.4973071
7. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-natural-technogenic system of sustainable environment of vital activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:5-12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12 (rus.).
8. Mityagin S.D. Urban development base for sustainable development of urbanized territories. *Urban Planning*. 2016; 2(42):72-75. (rus.).
9. Shcherbina E., Gorbenkova E. Smart city technologies for sustainable rural development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022039. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022039
10. Ilyichev V.A., Emelyanov S.G., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. *Innovative technologies in the construction of cities. Biosphere compatibility and human potential*. Moscow, Publishing house ASV, 2019; 208. (rus.).
11. Bakaeva N.V., Chaikovskaya L.V., Kormina A.A. The urban planning as a complex activity oriented at the foundation of socially oriented city environment. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2019; 1(25):94-107. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106. (rus.).
12. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. The problem of norming in the field of comfort and safety environment of the city. *Building and Reconstruction*. 2020; 1(87):101-112. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-101-112 (rus.).
13. Shubenkov M., Shubenkova M. Towards to the question of searching a balanced coexistence of natural and urbanized territories. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2019; 3(27):3-17. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-27-3-3-16 (rus.).
14. Shubenkov M.V., Mityagin S.D., Gaevskaya Z.A. The sixth technological revolution in construction industry: Noospheric paths. *Advances in Energy and Environment Research*. 2017:129-134. DOI: 10.1201/9781315212876-27
15. Kabanov V.N., Dontsov D.G., Yushkova N.G., Mikhailova E.V. *Spatial and strategic development of the territory*. Volgograd, Volgograd State Agrarian University, 2018; 276. (rus.).
16. Moiseev Yu.M. Building the management capacity of spacial development of urban territories. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 3:13-22. (rus.).
17. Yenin A.E., Liventceva A.V. System approach in urban planning. History. General foundations. Objects of system researches. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017; 1(33):91-101.
18. Ukrainsky V.N. Formation of regional development systems: foreign experience. *Regionalistics*. 2018; 5(1):31-40. DOI: 10.14530/reg.2018.1.31 (rus.).
19. Smilka V.A. Detection of reflexive signs in town planning systems of Ukraine and Republic of Belarus. *Science & Technique*. 2018; 17(2):123-129. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-123-129
20. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Evaluation of Russia's innovation activity levels in construction.

Civil Engineering and Urban Planning IV. 2015; 677-680. DOI: 10.1201/b19880-128

21. Moulaert F., Sekia F. Territorial innovation models: a critical survey. *Regional Studies*. 2003; 37(3):289-302. DOI: 10.1080/0034340032000065442

22. Jabareen Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*. 2013; 31:220-229. DOI: 10.1016/j.cities.2012.05.004

23. Yushkova N.G., Gushchina E.G., Gaponenko Yu.V., Dontsov D.G., Gushchin M.S. Infrastructural Priorities and Regularities of Spatial Development of Regional Systems. *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences*. 2019; 474-483. DOI: 10.15405/epsbs.2019.04.51

24. Alekseev Yu.A. An approach to arrangement and formation of the new system and structure of standard technical documentation for underground space development. *Urban Planning*. 2012; 5:68-74. (rus.).

25. Perekopskaya M.A., Alekseev Yu.V. Management of territories that accommodate advanced timber industry enterprises (as illustrated by Sweden and Russia). *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(9):1228-1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238 (rus.).

26. Kamrowska-Załużska D., Obracht-Prondzyńska H. Urban regeneration in urban functional areas in Poland as an instrument of implementation of the EU Cohesion Policy. *Growth and Change*. 2020; 51(1):278-301. DOI: 10.1111/grow.12361

27. Yushkova N.G. Improvement of tool support of the spatial approach to regional planning: problems, specifics, trends. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2014; 6(36):225-242. DOI: 10.15838/esc/2014.6.36.17 (rus.).

28. Michalka L., Kovac B. A new tool of urban stability and development in spatial planning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471:092046. DOI: 10.1088/1757-899X/471/9/092046

29. Shvetsov A.N., Demyanenko A.N., Ukrainsky V.N. Destructive stereotypes of Russian strategic

planning and their possible consequences for practice of regional strategy development (part 1). *Regionalistics*. 2016; 3(3):48-60. (rus.).

30. Yushkova N. Restructuring of regional long-term planning principles: adaptation or strategic choice. *Technology Audit and Production Reserves*. 2014; 4(2):(18):44. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.26398

31. Kolyasnikov V.A. Strategy of spatial development in urban planning Russia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 962:032033. DOI: 10.1088/1757-899X/962/3/032033

32. Yushkova N.G., Gushchina E.G., Dontsov D.G., Fiktner O.A. Spatial development dichotomy: assessment of the potential and implementation of territorial systems. *The European Proceedings of Social & Behavioral Sciences*. 2019; 77:792-803. DOI: 10.15405/epsbs.2019.12.05.97

33. Zeković S., Vujošević M., Maričić M. Spatial regularization, planning instruments and urban land market in a post-socialist society: The case of Belgrade. *Habitat International*. 2015; 48:65-78. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.03.010

34. Yushkova N.G. Local urban-planning formations as a foundation for reorganizing regional systems of settlement: prerequisites for developing the methodology. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 3(47):76-90. DOI: 10.36622/vstu.2020.47.3.007

35. Wang J. The economic impact of Special Economic Zones: Evidence from Chinese municipalities. *Journal of Development Economics*. 2013; 101:133-147. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2012.10.009

36. Graboviy P. Reconstruction and modernization of industrial parks. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:08028. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108028

37. Leonov S.N. Preferential regimes of established local growth points and its impact on the economy of the Far East. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2020; 13(3):28-45. DOI: 10.15838/esc.2020.3.69.3

Received June 11, 2021.

Adopted in revised form on September 16, 2021.

Approved for publication on September 17, 2021.

B I O N O T E S: **Natalia G. Yushkova** — PhD in Architecture, Associate Professor, Adviser of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Ecological Construction and Urban Economy; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RISC: 513635, Scopus: 57193128174, ResearcherID: AAR-1414-2021, ORCID: 0000-0001-8845-9585; ng_yushkova-v@mail.ru;

Yuri V. Alekseev — Doctor of Architecture, Professor of the Department of Urban Planning of the Institute of Construction and Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690296; alekseev-grado@yandex.ru.

Международный стандарт оценки воздействия на среду жизнедеятельности BREEAM Communities (градостроительство) в России

Н.А. Самойлова^{1,2}

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

² *Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В Градостроительных кодексах РФ (ГК РФ) 1998 и 2005 гг. заложены основы устойчивого развития территорий в сфере градостроительства. Из-за многочисленных изменений в ГК РФ 2005 г. пока недостаточно прикладных положений, в которых представлены все требования, предъявляемые к градостроительной документации, а также был бы изложен прикладной практический порядок их подготовки. В соответствии с поставленными в России целями и задачами повышения качества и комфортности среды жизнедеятельности необходимо использовать научную и просветительскую деятельность по обустройству территорий и совершенствовать конкретные требования к градостроительной документации и ее оценку на соответствие легитимным требованиям, в том числе зарубежным.

Материалы и методы. Проведены сравнительно-сопоставительный анализ нормативно-правовой документации, научно-практический обзор информации по теме градостроительного регулирования устойчивого развития, в основе которого международный метод оценки BREEAM, разработанный в 1990 г. британской государственной организацией BRE Global.

Результаты. Изложены основы российского и международного градостроительного регулирования в целях устойчивого развития и место международного стандарта оценки воздействия на среду жизнедеятельности Breeam Communities. Сертификация по BREEAM Communities для заинтересованных участников градостроительной деятельности — это своего рода страховка и разделение ответственности органов публичной власти за утверждаемые (согласовываемые) ими градостроительные документы.

Выводы. Представляется, что сертификация по BREEAM, т.е. оценка соответствия как планируемых, так и существующих объектов и территорий определенным требованиям, обретет легитимность и популярность в Российской Федерации, в том числе благодаря адаптации международной оценки BREEAM к отечественной нормативно-технической базе (BREEAM RU) и образовательным программам по обучению BREEAM, включая BREEAM Communities (градостроительство).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительство, устойчивое развитие, BREEAM международный стандарт, BREEAM Communities, основы процесса планирования, основы процесса градостроительного регулирования, градостроительная документация, программа ЭВМ «Система поддержки принятия решений (СППР) для оценки вариантов решений заинтересованными участниками градостроительной деятельности для различных градостроительных типов территорий»

Благодарности. Исследование выполнено по итогам обучения по программе BREEAM AG, которую реализует НИУ МГСУ с Академией BRE (Великобритания). Автор выражает благодарность: ректору НИУ МГСУ П.А. Акимову, президенту НИУ МГСУ В.И. Теличенко, руководителю НОЦ «Зеленые стандарты» А.А. Бенуж за возможность бесплатного обучения по программе в декабре 2020 – феврале 2021 гг. и полученный сертификат BREEAM AG, вручение которого состоялось 19 мая 2021 г. с участием представителей Посольства Великобритании в Москве и компании BRE в Великобритании.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самойлова Н.А. Международный стандарт оценки воздействия на среду жизнедеятельности BREEAM Communities (градостроительство) в России // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1168–1181. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1168-1181

Urban planning in Russia and international standard for assessing the impact on the environment of BREEAM Communities

Nadezhda A. Samoylova

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

² *Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In order to implement the decisions of the Rio De Janeiro Conference 1992, the Russian President's Decrees of 04.02.1994 No. 236 "On the State Strategy of the Russian Federation for Environmental Protection and Sustainable Development" and from 01.04.1996 No. 440 "On the Concept of the Transition of the Russian Federation to Sustainable

Development” were adopted. The Russian Urban Planning Codes of 1998 and 2005 laid the foundations for sustainable development of the territories in the field of urban planning. The 2005 Russian Urban Planning Code lacks applied provisions, which present all the requirements for urban documentation, and would set out an applied practical procedure for their preparation. This was due to numerous changes of Code. In accordance with the goals and objectives set in Russia to improve the quality and comfort of the living environment, it is necessary to use scientific and educational activities on the development of the territories and improve the specific requirements for urban planning documentation and its assessment to meet legitimate requirements, including foreign ones.

Materials and methods. Comparative analysis of regulatory documents, scientific and practical review of information on the topic of urban planning regulation of sustainable development, based on the international assessment method BREEAM, which was developed in 1990 by the British state organization BRE Global.

Results. The foundations of Russian and international urban planning regulation for sustainable development are outlined: overview and facts of the international assessment method BREEAM, incl. BREEAM Communities; basics of urban planning and regulation: information on the demand for urban planning, environmental, interdisciplinary technologies. BREEAM Communities certification for interested participants in urban planning activities is a kind of insurance and separation of responsibility of public authorities for approved (agreed) city planning documents.

Conclusions. We believe that the method of certification known abroad as BREEAM, i.e. assessing the compliance of both planned and existing facilities and territories to certain requirements, will gain legitimacy and popularity in the Russian Federation. This is due to the adaptation of the international BREEAM assessment to the domestic regulatory framework (BREEAM RU), as well as to the educational programs for the training of BREEAM, including “BREEAM Communities”.

KEYWORDS: urban planning, sustainable development, BREEAM international standard, BREEAM Communities, the basics of the planning process, the basics of the planning regulation, urban and town planning documentation, masterplanning projects, computer program Decision Support Solutions (DSS)

Acknowledgments: The study was carried out following the results of training under the BREEAM AG program, which is implemented by the NRU MGSU with the BRE Academy (Great Britain). The author expresses his gratitude to: rector of NRU MGSU P.A. Akimov, President of NRU MGSU V.I. Telichenko, the head of the Scientific and educational center “Green Standards” A.A. Benuzh for the opportunity to study free of charge under the program in December 2020 – February 2021, and the received BREEAM AG certificate, which was presented on May 19, 2021 with the participation of representatives of the British Embassy in Moscow and the BRE company in the UK.

FOR CITATION: Samoylova N.A. Urban planning in Russia and international standard for assessing the impact on the environment of BREEAM Communities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1168-

1181. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1168-1181 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В российском градостроительном сообществе уже имеется понимание, что устойчивое развитие (sustainability) — это не только экологическая ответственность перед существующими и будущими поколениями [1, 2]. Организация Объединенных Наций по промышленному развитию ЮНИДО (англ. UNIDO — United Nations Industrial Development Organization) в 2017 г. отнесла термин «smart city» к сфере информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в части поддержки устойчивого развития поселений в борьбе за их конкурентоспособность между собой [3].

В соответствии с Градостроительным кодексом РФ¹ (далее — ГК РФ): «Территориальное планирование направлено на определение в документах территориального планирования назначения территорий исходя из совокупности социальных, экономических, экологических и иных факторов в целях обеспечения устойчивого развития территорий, развития инженерной, транспортной и социальной инфраструктур, обеспечения учета интересов граждан и их объединений, Российской Федерации, субъектов Российской Федерации, муниципальных образований» (ст. 9); «Подготовка документации по планировке террито-

рии осуществляется в целях обеспечения устойчивого развития территорий, в том числе выделения элементов планировочной структуры, установления границ земельных участков, установления границ зон планируемого размещения объектов капитального строительства» (ст. 41).

Однако из-за многочисленных изменений в ГК РФ пока недостаточно прикладных инструкций и положений, в которых представлены все требования, предъявляемые к градостроительной документации, а также был бы изложен прикладной практический порядок их подготовки (в конце 2020 г. принят Федеральный закон в целях обеспечения комплексного развития территорий²); претерпевает изменение деятельность государственных органов и органов местного самоуправления и их взаимодействие с заинтересованными участниками градостроительной деятельности (собственниками, пользователями); в 2016 г. утвержден профессиональный стандарт «Градостроитель», в котором изложены требования к исполнителям и руководителям в сфере пространственного обустройства территории, но эти документы еще не нашли своего реального применения у работодателей и заказчиков градостроительной документации; научная деятельность и просветитель-

¹ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ. URL: <http://base.consultant.ru>

² О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий : Федеральный закон от 30.12.2020 № 494-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372677/

ская деятельность среди населения по обустройству территорий не стали полноценными средствами реализации градостроительной политики.

Важно отметить отсутствие в России федеральных нормативов градостроительного проектирования (только региональные и местные — глава 3.1 ГК РФ). Научная база СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» была сформирована в основном в советское время. В последние годы утверждены только предварительные национальные стандарты РФ («зеленые» стандарты)³, ГОСТ «Экологические требования к объектам недвижимости»⁴, СТО НОСТРОЙ «Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания»⁵ и методическое руководство Минстроя России по развитию застроенных территорий и освоению новых «Стандарт комплексного развития территорий», указанный в Национальном проекте «Жилье и городская среда»⁶.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования проведен научно-практический обзор международного метода оценки BREEAM⁷ в сфере градостроительства и сравнительно-сопоставительный анализ отечественной и зарубежной нормативно-правовой доку-

³ ПНСТ 329-2018. «Зеленые» стандарты. «Зеленая» продукция и «зеленые» технологии. Оценка соответствия по требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения; ПНСТ 330-2018. «Зеленые» стандарты. Основные положения и принципы; ПНСТ 331-2018. «Зеленые» стандарты. «Зеленая» продукция и «зеленые» технологии. Классификация; ПНСТ 332-2018. «Зеленые» стандарты. «Зеленая» продукция и «зеленые» технологии. Критерии отнесения; ПНСТ 349-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция. Термины и определения; ПНСТ 350-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Классификация; ПНСТ 351-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Критерии отнесения; ПНСТ 352-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения.

⁴ ГОСТ Р 54964-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости.

⁵ СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011. «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания.

⁶ Стандарт комплексного развития территорий: методическое руководство по развитию застроенных территорий и освоению новых: разработано Минстроем России и ДОМ.РФ вместе с КБ Стрелка. URL: <https://xn--d1aqf.xn--plai/urban/standards/printsipy-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/>

⁷ BREEAM. URL: <https://www.breeam.com/>

ментации, которая служит для оценки зданий, сооружений и инфраструктуры на территории^{8,9} [4–12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате осуществления научно-практического обзора ведущего в мире метода оценки устойчивости для градостроительных документов — BREEAM Communities и сравнительно-сопоставительного анализа нормативно-правовой документации сформулированы научно-практические тезисы и предложения.

1. Обзор и факты. Международный метод оценки BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), разработанный в 1990 г. британской государственной организацией BRE Global, актуален для профессионального строительного комплекса, охватывающего весь строительный жизненный цикл объектов, в том числе в Российской Федерации.

Принцип расчета рейтинга оценки (рис. 1) одинаков для всех шести стандартов BREEAM: Communities, Infrastructure, New Construction, Refurbishment and Fit out, In-Use, Deconstruction (по-русски, соответственно: градостроительство, инфраструктура, новое строительство, реконструкция и отделка, эксплуатация здания, разборка здания).

Стандарт BREEAM Communities (градостроительство)^{8,9} появился в «семействе» BREEAM с 2009 г., а в 2012 г. был существенно обновлен. Этот международный стандарт находится как бы в «информационной тени» своих более известных собратьев из BRE: BREEAM New Construction или BREEAM In-Use. По данным BRE на начало 2021 г., в мире насчитывается немного завершенных проектов с сертификацией по BREEAM Communities (рис. 2). В основном эти проекты в Великобритании. Это выглядит незначительным по сравнению с другими стандартами (их семь), разработанными BRE Global (рис. 3).

В результате исследования выявлено, что отдельные объекты, прошедшие сертификацию BREEAM, относятся к градоформирующим среду жизнедеятельности не только самого конкретного объекта, который получил подтверждение стандарта BREEAM, но и оказывают синергетический эффект на окружающие его территории. Примеры таких объектов — торговые центры МЕГА (рейтинг оценки которых в российских городах по BREEAM In-Use International Part 1 — Asset Performance (по эффективности активов) в пределах от 75,2 (Казань) до 56,5 (Уфа); по BREEAM In-Use International Part 2 — Building Management (по эффективности управления) в пределах от 61,9 (Краснодар) до 55,8

⁸ Achieving Sustainable Masterplans BREEAM Communities. BRE Global Ltd, 2018.

⁹ BREEAM Communities Integrating sustainable design into masterplanning, BRE Global Ltd, 2013 KN5084.

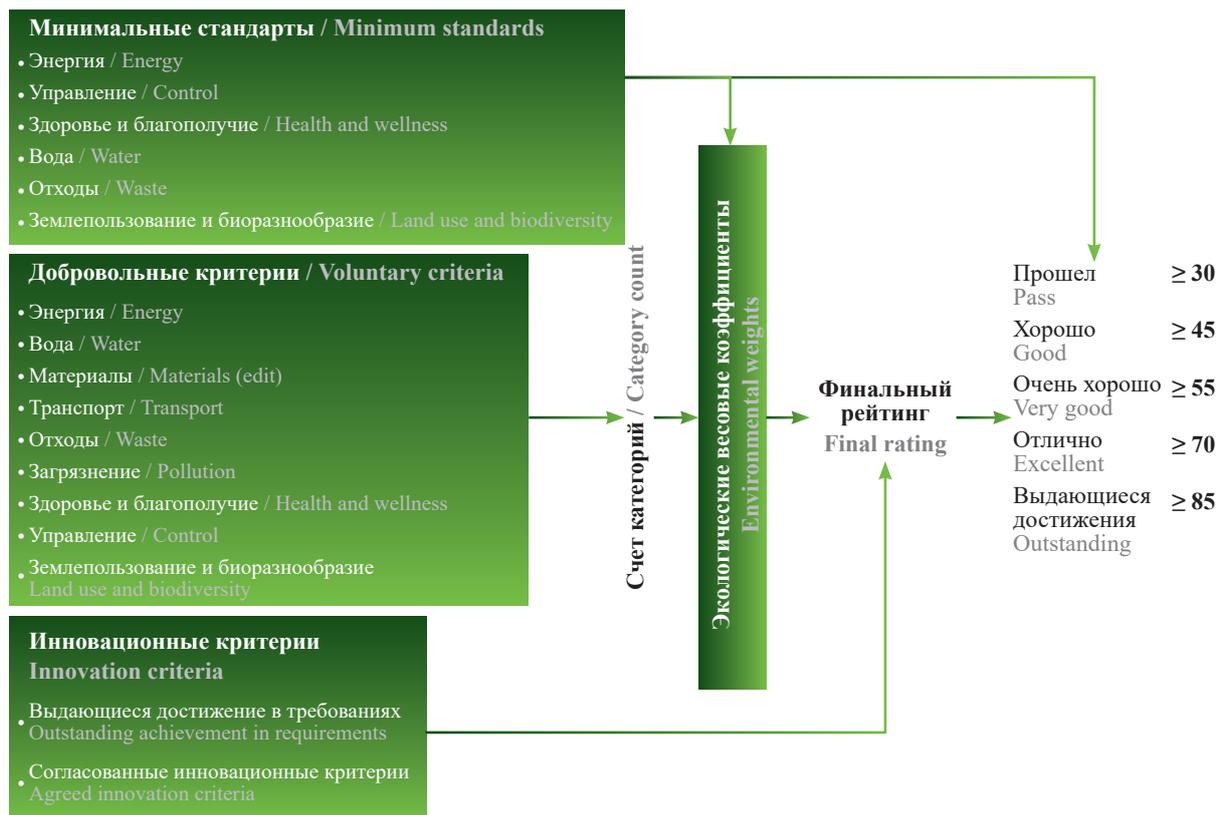


Рис. 1. Схема расчета рейтинга оценки BREEAM¹⁰

Fig. 1. BREEAM rating benchmarks¹⁰

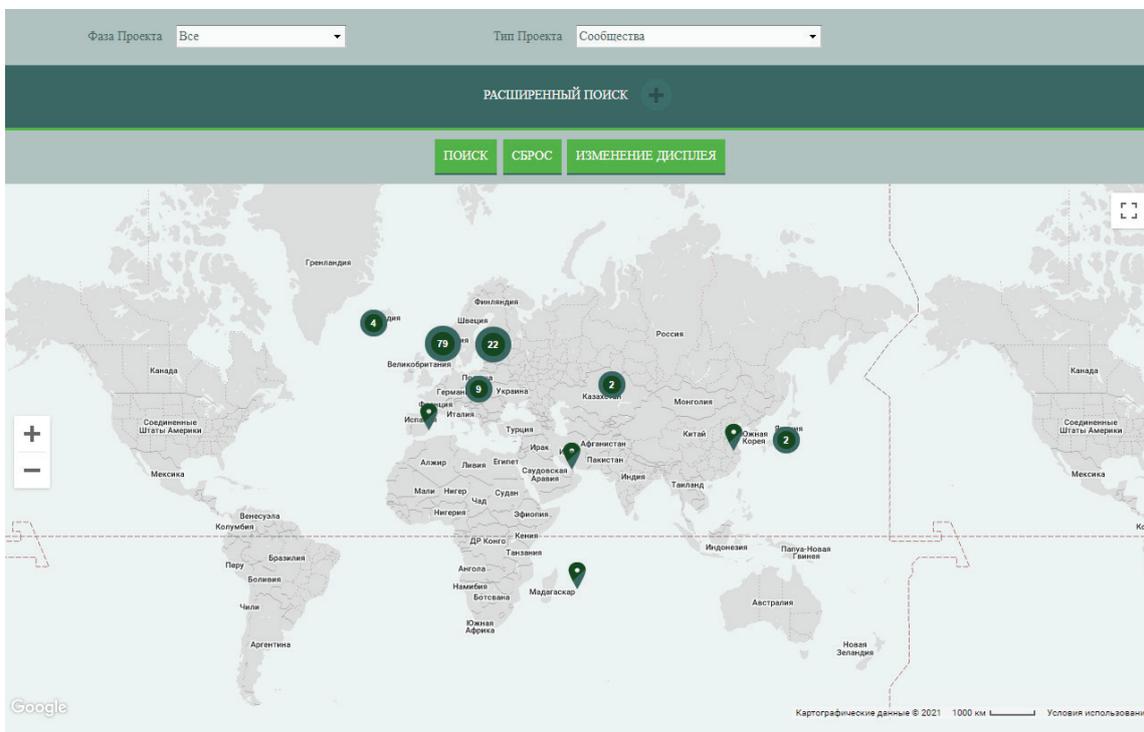


Рис. 2. Карта-схема: проекты с сертификацией по BREEAM Communities в мире (количество на 20.02.2021)¹¹

Fig. 2. Map: projects with BREEAM Communities certification in the world¹¹

¹⁰ По материалам BREEAM AG.

¹¹ BREEAM. URL: <https://tools.breeam.com/projects/explore/buildings.jsp>

которые служат для создания зданий, сооружений и инфраструктуры.

Чтобы оценивать, надо понимать «природу» подготовки градостроительных документов (процесс их планирования). По каким правилам и нормам они подготавливаются, т.е. что именно будет подлежать оценке (соответствие каким нормам и показателям)?

Градостроительное нормирование — это регламентируемая разными видами законодательства система функционирования взаимодополняющих друг друга институтов при недопущении пересечения присущих каждому институту специфических областей нормирования:

- института *технических регламентов безопасности*¹² (представляемых либо непосредственно, либо опосредованно — в том числе через своды правил, в частности СП «Градостроительство»);
- института *градостроительных регламентов* (определяющих правовой режим использования земельных участков) в составе правил землепользования и застройки;
- института *нормативов градостроительного проектирования*, определяющих балансы между обслуживаемыми объектами застройки и обслуживаемыми застройку объектами инфраструктуры различных видов.

Указанные институты градостроительного нормирования должны включать [13]:

I — показатели-требования в виде требований технических регламентов безопасности, требований охраны объектов культурного наследия, требований правового режима использования земельного участка;

II — показатели в виде обязательств власти относительно инфраструктурной обеспеченности застройки;

¹² О техническом регулировании : Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ; Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ; О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ; Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 04.07.2020 № 985; Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»: Приказ Росстандарта от 02.04.2020 № 687.

III — показатели рамочные-балансовые для их последующего перевода из генерального плана в показатели правил землепользования и застройки и нормативов градостроительного проектирования.

4. Спрос на градостроительные, экологические, междисциплинарные технологии. За последние тридцать лет многие мировые корпорации переняли концепцию устойчивого развития не просто как красивое название и легкое решение для спекуляций, но как ощутимый ответ многим проблемам, грозящим их бизнесу. Среди этих проблем — экологические риски, социальное неравенство, растущая осведомленность заказчиков и доверие этическим компаниям; увеличение стоимости и ограничений доступа к сырьевым материалам и топливу.

Спрос на инновационные технологии растет как со стороны клиентов, так и со стороны рынка. Согласно статистике World Building Green Trends 2016 г., процент компаний, желающих получить «зеленый» сертификат для более 60 % своих проектов, удвоился более чем в два раза с 18 до 37 % за указанный год¹³. Преимуществами для компаний являются инвестиции (доход на инвестиции) и снижение риска. Экологическая составляющая ими видится зачастую как добавленная стоимость.

Программа ООН по окружающей среде ЮНЕП (UNEP — United Nations Environment Programme) ежегодно определяет ключевые факторы для окружающей среды, а Программа ООН по населенным пунктам ООН-Хабитат (UN-HABITAT — The United Nations Human Settlements Programme) — по содействию устойчивому развитию населенных пунктов. Российская Федерация является участником этих программ и, возможно, международный метод оценки BREEAM градостроительных документов будет востребован при рассмотрении как крупных международных проектов с участием государства и частных компаний (в том числе зарубежных), так и государственно-частного и муниципально-частного партнерства на территории России.

Следует отметить, что в России по состоянию на середину 2021 г. в перечне сертифицированных объектов по BREEAM в основном — бизнес-парки, промышленные парки и логистические парки Москвы и Московской области, офис Оргкомитета по Олимпийским играм в Сочи.

5. BREEAM Communities (международный стандарт оценки воздействия на среду жизнедеятельности — «градостроительство»). Изначально в Англии стандарт BREEAM Communities создавался под задачи местных органов самоуправления, муниципалитетов. Создатели стандарта пишут, что он ориентирован на «medium to large scale developments, including new communities and regeneration projects»,

¹³ Аганова К. BREEAM Communities: для тех, кто строит большие планы (5 сентября 2016). URL: <https://green-city.ru/breem-communities-dlya-tex-kto-stroit-bolshie-plany/>

т.е. на средне- и крупномасштабные градостроительные проекты, включая все виды градостроительных трансформаций: комплексное создание новых материальных объектов и освоение новых территорий, реновацию, ревитализацию, регенерацию (реставрацию или воссоздание облика исторических или существующих материальных объектов и территорий) и градостроительную рекультивацию нарушенных территорий, являющихся накопленным «экологическим ущербом» в предыдущие периоды хозяйственной деятельности и снижение природных и техногенных рисков в будущем. В стандарте нет прямого ограничения на объем оцениваемой территории. Разброс площадей, проходивших сертификацию, от 2 до 180 га.

В стандарте BREEAM Communities зафиксировано стремление иметь на территории обще-

ственные пространства, снизить роль автомобиля: больше велосипедов, тротуаров, зон общения и отдыха, вовлечение в соучастную градостроительную трансформацию территории (см. табл., подготовленную по материалам BREEAM AG).

На этапе 1 BREEAM Communities оцениваются принципы градостроительной трансформации территории с учетом ограничений и возможностей в рамках устойчивого развития сообщества. Все пункты данного раздела содержат обязательные критерии, на основании которых принимаются решения по выбору территории. При условии выполнения обязательных критериев выдается промежуточный сертификат BREEAM Communities. После того как территория определена, проводят детальные исследования по обнаружению рисков затопления, по экологии, энергетике, транспортному сообщению

Этапы оценки BREEAM Communities

The BREEAM rating benchmarks for the BREEAM Communities

Этап 1: Оценка воздействия на окружающую среду (минимальные стандарты, обязательные)

Stage 1: Establishing the principle of development (All of the issues in this section contain mandatory criteria)

GO 01	Градостроительные принципы устойчивого развития. Задача: убедиться, что нужды, идеи и знания сообщества используются для улучшения качества вовлечения участников на этапах прогнозирования, планирования, проектирования. Consultation plan. To ensure the needs, ideas and knowledge of the community are used to improve the quality of stakeholder engagement, throughout the design, planning and construction process.
SE 01	Экономическое влияние. Задача: повысить экономическое благосостояние, когда градостроительная трансформация территории привлекает дополнительные капиталовложения, создает рабочие места и оптимизирует существующую экономическую активность на местности и сопутствующую экономику. Economic impact. To increase economic wellbeing by ensuring that the development attracts inward investment, creates jobs and complements and enhances existing economic activity in the local area and surrounding economy.
SE 02	Демографические нужды и приоритеты. Задача: убедиться в том, что планы по обеспечению жилья, услуг, площадей и объектов социальной инфраструктуры основаны на местных демографических трендах и приоритетах. Demographic needs and priorities. To ensure that the development plans for the provision of housing, services, facilities and amenities is based upon the local demographic trends and priorities.
SE 03	Оценка риска затопления. Задача: убедиться, что план принимает в расчет риски затопления и, где это имеет место, принимает соответствующие меры для снижения риска затопления на территории, где запланированы градостроительные трансформации, и на прилегающих к ней территориях. Flood risk assessment. To ensure that the development takes account of flood risk and, where it is present, takes appropriate measures to reduce the risk of flooding to the development and the surrounding areas.
SE 04	Шумовое загрязнение. Задача: убедиться, что в плане заложено шумоподавление от существующих источников шума, снижение возможных шумовых конфликтов и защита прилегающих зон, чувствительных к шуму от источников шума, связанных с новым строительством. Noise pollution. To ensure that the development is designed to mitigate the impacts of noise. This includes mitigation from existing sources of noise, reducing potential noise conflicts between future site occupants, and protecting nearby noise-sensitive areas from noise sources associated with the new development.
RE 01	Энергетическая стратегия. Задача: минимизировать потребление энергии, необходимой для работ, потребления и выбросов углекислого газа. Energy strategy. To recognise and encourage developments designed to minimise operational energy demand, consumption and carbon dioxide emissions.
RE 02	Существующие здания, строения и инфраструктура. Задача: учесть углерод, использованный в существующих зданиях и инфраструктуре, и продвигать его повторное использование, где это возможно. Existing buildings and infrastructure. To take account of the embodied carbon in existing buildings and infrastructure and to promote their re-use where possible.
RE 03	Стратегия водопользования. Задача: минимизировать потребление воды на основании ее эффективности и соответствующих вариантов сторонних поставок, принимая во внимание текущую и будущую доступность водных ресурсов. Water strategy. To ensure that the development is designed to minimise water demand through efficiency and appropriate supply-side options, taking full account of current and predicted future availability of water in the area.

Продолжение табл. / Continuation of the Table

LE 01	Экологическая стратегия. Задача: убедиться, что застройка сохраняет существующую природную среду, где это возможно и осуществимо, а где нет, минимизирует и снижает влияние на сложившуюся среду обитания и продвигает меры для улучшения биоразнообразия на территории локально и глобально Ecology strategy. To ensure that the development protects existing natural habitats wherever possible and practical and where not, minimises and mitigates its impact on existing habitats and promotes measures to enhance biodiversity on site and in the locality.
LE 02	Землепользование. Задача: способствовать использованию ранее градостроительно освоенных территорий и избегать использования земель, ранее не вовлеченных в хозяйственное использование Land use. To encourage the use of previously developed or contaminated land and avoid land which has not been previously disturbed.
TM 01	Транспорт. Задача: убедиться, что стратегии по развитию транспорта и передвижения снижают воздействие планируемого градостроительного освоения территории на существующую транспортную инфраструктуру, улучшают экологическую и социальную устойчивость Transport assessment. To ensure transport and movement strategies reduce the impact of the development upon the existing transport infrastructure and improve environmental and social sustainability through transport.
<i>Этап 2: Установление планировки застройки (добровольные критерии, обязательный только GO 02) Stage 2: Determining the layout of the development (The only mandatory element in Step 2 is in the community ownership issue GO 02 – Consultation and engagement.)</i>	
GO 02	Консультация и вовлечение. Задача: убедиться, что нужды, идеи и знания сообщества и ЗУГД используются для улучшения качества и доступности среды жизнедеятельности в ходе проектирования. Consultation and engagement. To ensure the needs, ideas and knowledge of the community and key stakeholders are used to improve the quality and acceptability of the development throughout the design process.
GO 03	Информационное обеспечение проекта. Задача: убедиться, что сообщество и другие ЗУГД имеют доступ к градостроительным планам, подтверждая то, что будущая трансформация территории является инклюзивной Design review. To ensure that the masterplan's design is reviewed by the community and other key stakeholders, ensuring that it supports a vibrant, healthy, functional and inclusive development.
SE 05	Обеспечение жильем. Задача: минимизировать социальное неравенство и укрепить социально-инклюзивное сообщество путем предоставления жилья в застройке Housing provision. To minimise social inequalities and foster a socially inclusive community by ensuring appropriate housing provision within the development.
SE 06	Предоставление услуг, помещений и объектов инфраструктуры. Задача: предоставить жизненно важные помещения и убедиться, что они расположены в приемлемой и безопасной пешеходной доступности Delivery of services, facilities and amenities. To ensure essential facilities are provided and that they are located within a reasonable and safe walking distance.
SE 07	Общественные зоны. Задача: продвигать социальное взаимодействие путем создания комфортных и оживленных мест в общественной зоне Public realm. To ensure the development provides a comfortable outdoor environment through the control of climatic conditions on a micro scale.
SE 08	Микроклимат. Задача: обеспечить комфортную окружающую среду для территории, на которой планируются градостроительные трансформации посредством контроля климатических условий в малом масштабе Microclimate. Objective: to provide a comfortable environment for the territory where urban planning transformations are planned by controlling climatic conditions on a small scale
SE 09	Коммунальные удобства. Задача: предоставить хороший доступ к существующим сетям инфраструктуры на территории с минимальными периодами отключений на реконструкцию, а также предусмотреть будущий рост коммунальных удобств Utilities. Objective: To provide easy access to site service and communications infrastructure, with minimal disruption and need for reconstruction, and to allow for future growth in services.
SE 10	Адаптация к изменению климата. Задача: убедиться в устойчивости территории к известным и прогнозируемым последствиям климатического изменения Adapting to climate change. To ensure the development is resilient to the known and predicted impacts of climate change.
SE 11	Зеленая инфраструктура. Задача: предоставить доступ к высококачественному пространству в рамках окружающей среды или городской зеленой инфраструктуры для всех желающих Green infrastructure. To ensure access to high quality space in the natural environment or urban green infrastructure for all.
SE 12	Местная парковка. Задача: парковка должна быть пригодна для пользователей будущих зданий и сооружений и хорошо интегрирована в сложившуюся застройку Local parking. To ensure parking is appropriate for the expected users and well integrated into the development.
SE 13	Управление риском затопления. Задача: избежать, снизить и отсрочить сток дождевых вод в городскую канализацию и водоемы, уменьшая таким образом количество вод; риск местного затопления на и за пределами стройплощадки, загрязнение общественных водоемов и другой ущерб окружающей среде Flood risk management. To avoid, reduce and delay the discharge of rainfall to public sewers and watercourses, thereby minimising; the risk of localised flooding on and off site, watercourse pollution and other environmental damage.

LE 03	Загрязнение воды. Задача: убедиться в наличии мер для защиты местных водоемов от загрязнения и другого ущерба окружающей среде Water pollution. To ensure that measures are put in place to protect the local watercourse from pollution and other environmental damage.
LE 04	Улучшение экологической ценности. Задача: убедиться, что экологическая ценность застройки доведена до максимального уровня путем постоянного улучшения Enhancement of ecological value. To ensure that the ecological value of the development is maximised through enhancement.
LE 05	Ландшафт. Задача: убедиться, что характер ландшафта сохранен и, где это возможно, улучшен путем интеграции его особенностей и дизайна в местную окружающую среду Landscape. To ensure that the character of the landscape is respected and, where possible, enhanced through the location of features and design appropriate to the local environment.
TM 02	Безопасные и привлекательные улицы. Задача: создать безопасные и привлекательные пространства, способствующие общению между людьми и позитивному восприятию пространства Safe and appealing. To create safe and appealing spaces that encourage human interaction and a positive sense of place.
TM 03	Сеть велодорог. Задача: продвигать велотранспорт в качестве досуга и альтернативы использованию других транспортных средств, обеспечив безопасную и эффективную сеть велодорог Cycling road network. To promote cycling as a leisure activity and as an alternative to vehicle use by providing a safe and efficient cycle network.
TM 04	Доступность общественного транспорта. Задача: обеспечить доступ к сети частого и удобного общественного транспорта, связанного с фиксированными общественными транспортными узлами (поезда, автобусы, трамваи или метро) и локальными центрами Access to public transport. To ensure the availability of frequent and convenient public transport links to fixed public transport nodes (train, bus, tram or tube) and local centres.
<i>Этап 3: Проектирование деталей (инновационные критерии, не обязательные)</i> <i>Stage 3: Designing the details (None of the issues in Step 3 are mandatory.)</i>	
GO 04	Общественное управление помещениями. Задача: поддерживать активное вовлечение сообществ в разработку, управление и/или владение выбранными помещениями Community management of facilities. To support communities in active involvement in developing, managing and/or owning selected facilities.
SE 14	Местный колорит. Задача: убедиться, что градостроительная трансформация территории не идет в разрез с местными особенностями, сохраняя при этом свои отличительные черты Local vernacular. To ensure that the development relates to the local character whilst reinforcing its own identity.
SE 15	Инклюзивный дизайн. Задача: создать инклюзивное сообщество путем улучшения доступности территории для большего количества текущих и будущих пользователей Inclusive design. To create an inclusive community by enhancing accessibility for as many current and future residents as possible.
SE 16	Световое загрязнение. Задача: убедиться, что освещение на территории выполнено таким образом, чтобы снижать световое загрязнение Light pollution. To ensure that lighting on site is designed to reduce light pollution.
SE 17	Обучение и навыки. Задача: убедиться, что градостроительная трансформация территории вносит свой вклад в местное пространство, помогая развивать навыки и предоставляя возможности обучения Training and skills. To ensure that the development contributes to the local area by enhancing skills and training opportunities.
RE 04	Устойчивость зданий к градостроительным изменениям. Задача: повысить устойчивость всех строений, расположенных на территории градостроительной трансформации Sustainable buildings. To increase the sustainability of all buildings within the development.
RE 05	Природосберегающие материалы. Задача: снизить воздействие строительства на окружающую среду путем использования природосберегающих материалов в общественных зонах Low impact. To reduce the environmental impact of construction through the use of low impact materials in the public realm.
RE 06	Эффективное использование ресурсов. Задача: продвигать эффективное использование ресурсов путем сокращения расходов во время строительства и в течение жизненного цикла застройки Resources efficiency. To promote resource efficiency by reducing waste during construction and throughout the life cycle of the development.
RE 07	Выбросы углерода от транспорта. Задача: сократить загрязнение, связанное с использованием автомобиля, и предоставить конкурентные альтернативы владению автомобилем Carbon emissions from transport. To reduce pollution associated with car use and provide viable alternatives to car ownership.

Окончание табл. / End of the Table

LE 06	Сбор дождевой воды. Задача: убедиться в эффективном использовании пространства для поверхностных сточных вод в целях минимизации потребности в воде Rainwater harvesting. To ensure that surface water run-off space is used effectively to minimise water demand.
TM 05	Передвижение на велосипеде. Задача: продвигать использование велосипеда путем предоставления удобств для его использования Cycling facilities. To promote cycling by ensuring the adequate provision of cyclist facilities.
TM 06	Общественный транспорт. Задача: способствовать использованию общественного транспорта в течение всего года, предоставляя безопасный и комфортный транспорт Public transport facilities. To encourage frequent use of public transport throughout the year by providing safe and comfortable transport facilities.

и местной экономике. Исследования помогут выстроить стратегии или обязательства застройщика, которые будут применены детально на этапах 2 и 3.

В связи с этим требования к обосновывающим материалам на этапе 1 разделены на два раздела. На этой стадии необходимы доказательства по предварительному планированию, однако, применение обязательств будет оценено лишь на финальной стадии оценки. При этом есть возможность проведения оценки BREEAM Communities (BREEAM Communities assessment), которая включает ряд данных исследований, при условии, что обязательные критерии были выполнены или будут выполнены в ходе последующих работ.

Таким образом, на этапе 1 оценивают, каково в сводных градостроительных планах воздействие на окружающую среду (the Environmental Impact Assessment).

Этап 2 включает оценку детального исследования по риску затопления, экологии, энергопотреблению, транспорту, демографии и локальной экономики для нахождения наиболее устойчивых решений для градостроительной трансформации. Местное сообщество и заинтересованные участники градостроительной деятельности (ЗУГД) могут принимать участие в проекте по мере того, как проектная группа выдает им различные градостроительные варианты. Участники проекта, консультанты по законодательству, градостроительный комитет и местное сообщество вовлекаются в оценку и усовершенствование вариантов проекта. На данном этапе BREEAM Communities проектная команда проектирует (разрабатывает концепции, эскизы) и тестирует варианты для:

- защиты и улучшения биоразнообразия и среды;
- передвижения пешеходов, велосипедистов и автомобилистов;
- общественного транспорта;
- улично-дорожной сети и планировочного каркаса;
- выбора типа жилья, его месторасположения и расположения обслуживающих его объектов;
- коммунальных услуг и обеспечения прочей инфраструктуры;
- общественных зон и зеленой инфраструктуры.

Единственным обязательным элементом на этапе 2 является опрос и участие сообщества по градостроительной трансформации территории и связанных с ней размещением (преобразованием) или сносом временных и капитальных объектов.

На этапе 3 оцениваются детали градостроительной трансформации территории. Информация, собранная посредством предыдущих действий и примененных в градостроительных стратегиях, будет использована для составления более детальных планов и дизайна. Местное сообщество и другие участники продолжают помогать выбирать варианты проекта, в то время как сводные планы обрастают деталями, что позволит в дальнейшем перейти к архитектурно-строительному проектированию.

На данном этапе проектная команда будет проектировать и тестировать варианты для:

- ландшафта;
- строительных материалов;
- управления и долгосрочного руководства помещениями и услугами;
- строительного дизайна;
- инклюзивного дизайна;
- эффективного использования ресурсов во время и после строительства;
- использования рабочей силы на местах во время строительства.

Ни один из пунктов этапа 3 не является обязательным для оценки по BREEAM Communities.

Изложенные цели по этапам оценки по BREEAM Communities и задачи (см. табл.), а соответственно и сами градостроительные документы, могут быть учтены только в процессе планирования градостроительной трансформации территории, осуществляемого органами публичной власти с использованием новых форм государственно-частного и муниципально-частного партнерства и вовлечения пользователей (физических и юридических лиц) в обсуждение на ранних стадиях подготовки проекта (идея, концепция), т.е. проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на растущие доказательства того, что применение «зеленых» технологий снижает затраты в долгосрочной перспективе проекта на протяжении

самого длительного этапа жизненного цикла — эксплуатации, да еще и учитывает утилизацию или повторное использование, даже в процессе строительства организации пока неохотно стремятся принимать такой подход, не желая увеличивать первоначальные инвестиции. Еще более усугубляется это в процессе планирования, особенно градостроительного планирования, в котором помимо организаций основную роль играют органы публичной власти (на национальном, региональном и местном уровнях).

Но в целом в результате исследования выявлена научно-практическая тенденция необходимости использовать опыт применения зарубежных оценок [4–6, 8, 10, 11] и возможность адаптации отечественных к BREEAM.

BREEAM оценки благоприятны как для общества потребителей готового проекта, так и снимают на ранней стадии планирования многие конфликтные моменты взаимоотношений на конкретной территории органов публичной власти, бизнеса (коммерческого и некоммерческого), общества и индивида, обладающего правами на земельный участок и (или) объект недвижимости⁸.

Сертификация по BREEAM Communities для инвесторов — это своего рода гарантия на раннем «бумажном» этапе реализации (т.е. в процессе градостроительного планирования), что потом им не придется участвовать в разбирательствах: почему строили так, а не иначе, кто сказал, что так лучше и т.д.; это гарантия, что инвестируемый проект оптимален по всем оцениваемым градостроительным международным параметрам. «В Англии тоже зачастую муниципалитет смотрит на сертификацию как на некоторый способ подстраховаться и разделить ответственность за мастер-план развития»¹¹.

В российском градостроительстве идет осмысление новейших знаний устойчивого развития, технологий «зеленого» строительства и систем сертификации^{14, 15, 16} [14–20]. К передовому можно отнести

¹⁴ Первая российская сертификация BREEAM RUS (24 ноября 2017). URL: <http://www.stroyorbita.ru/index.php/item/5822-pervaya-rossiyskaya-sertifikatsii-breeam-rus>;

¹⁵ Литвинцева Е. Город с сертификатом: как BREEAM и LEED улучшают территории. URL: <https://www.radidomapro.ru/ryedktzj/green/green/gorod-s-sertifikatom--kak-breeam-i-leed-ulutchscha-13141.php>;

¹⁶ Зеленое градостроительство и комфортная городская среда в России и за рубежом. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e6ff6ea3a53684f619cc2c4/zelenoe-gradostroitelstvo-i-komfortnaia-gorodskaja-sreda-v-rossii-i-za-rubejom-5e72717ff6d9d7377d6e2c7e>

попытку учета стандартов зеленого строительства в ГИС-программах, где для каждой категории основополагающими факторами (исходными данными) выступают соответствующие данные каждого критерия [21].

Вовлечение всех ЗУГД в процесс планирования с использованием современных ИКТ является актуальным в практической градостроительной деятельности и имеет научные основы развития⁸ [4, 5, 7, 9, 22]. В конкретном проекте такое вовлечение ЗУГД может быть оценено по одному из 10 разделов BREEAM — Innovation (Инновационные критерии¹⁷).

В настоящее время НИУ МГСУ, имея богатый опыт научно-технического совершенствования градостроительного проектирования, в т.ч. связанного со снижением природных и техногенных рисков на территории¹⁸, приступил к адаптации международной оценки BREEAM к отечественной нормативно-технической базе (BREEAM RU). В соответствии с лицензионным соглашением 2019 г. между ведущим мировым поставщиком образования в области строительства Академией BRE и МГСУ целесообразно внедрить в образовательные программы курсы по обучению BREEAM, в том числе BREEAM Communities (градостроительство), практическое руководство по устойчивому развитию и техническим аспектам, по применению BREEAM для градостроительной деятельности (градостроительного нормирования в процессе планирования и проектирования).

¹⁷ Самойлова Н.А. Градостроительное регулирование параметров качества среды жизнедеятельности с использованием инновационных технологий. Программа для ЭВМ «Система поддержки принятия решений (СППР) для оценки вариантов решений заинтересованными участниками градостроительной деятельности для различных градостроительных типов территорий». Примеры репрезентативного представления рейтинга вариантов для заинтересованных участников градостроительной деятельности // Инновационные предложения Российской академии архитектуры и строительных наук: альбом. 2019. № 1; 2020 (март). С. 11–12. URL: <http://www.raasn.ru/innovation/album>

¹⁸ Следует учесть сильные стороны отечественного градостроительного нормирования например в отношении природных и техногенных рисков, например: "Сейсмика", в отличие от обязательных SE02 им SE04 этапа 1 (см. табл. 1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Положихина М.А. Концепция устойчивого развития России // Экономические и социальные проблемы России. 2014. № 2. С. 108–125.

2. Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю. Биотехносферный подход к проектированию современных градостроительных систем // Наука, об-

разование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 193–196. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10039

3. *Weixi G., Hui L.* Sustainable city indexing: Towards the creation of an assessment framework for inclusive and sustainable // *Unido. Urban-Industrial Development*. 2017. Issue 2.

4. *Ardda N., Mateus R., Bragança L.* Methodology to identify and prioritise the social aspects to be considered in the design of more sustainable residential buildings — application to a developing country // *Buildings*. 2018. Vol. 8. Issue 10. P. 130. DOI: 10.3390/buildings8100130

5. *Borralló-Jiménez M., LopezdeAsiain M., Herrera-Limonés R., Lumbreras Arcos M.* Towards a circular economy for the city of seville: the method for developing a guide for a more sustainable architecture and urbanism (GAUS) // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 18. P. 7421. DOI: 10.3390/su12187421

6. *Cole R.J., Valdebenito M.J.* The importation of building environmental certification systems: International usages of BREEAM and LEED // *Building Research & Information*. 2013. Vol. 41. Issue 6. Pp. 662–676. DOI: 10.1080/09613218.2013.802115

7. *Inkoom E.E., Leiringer R.* Exploring the dynamic nature of the evolution of Building Environmental Assessment Methods (BEAMs): A call for a diachronic analysis of BEAMs // *Engineering Project Organization Journal*. 2016. Vol. 6. Issue 2–4. Pp. 104–114. DOI: 10.1080/21573727.2016.1270204

8. *Křídlová Burdová E., Selecká I., Vilčeková S., Burák D., Sedláková A.* Evaluation of family houses in Slovakia using a building environmental assessment system // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 16. P. 6524. DOI: 10.3390/su12166524

9. *Leiringer R.* Sustainable construction through industry self-regulation: the development and role of building environmental assessment methods in achieving green building // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 21. P. 8853. DOI: 10.3390/su12218853

10. *Plebankiewicz E., Juszczyk M., Kozik R.* Trends, costs, and benefits of green certification of office buildings: a polish perspective // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 8. P. 2359. DOI: 10.3390/su11082359

11. *Sánchez Cordero A., Gómez Melgar S., Andújar Márquez J.M.* Green building rating systems and the new framework level(s): A critical review of sustainability certification within Europe // *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 1. P. 66. DOI: 10.3390/en13010066

12. *Schweber L.* The effect of BREEAM on clients and construction professionals // *Building Research and Information*. 2013. Vol. 41. Pp. 129–145. DOI: 10.1080/09613218.2013.768495

13. *Трутнев Э.К.* Градорегулирование: Правовое обеспечение градостроительной деятельности: альтернативные модели законодательства и программа исправления его ошибок. М. : Институт экономики города, 2019. 682 с.

14. *Telichenko V.I., Benuzh A.A.* Evaluation of Russia's innovation activity levels in construction // *The 4th International Conference on Civil Engineering and Urban Planning CEUP*. 2015.

15. *Telichenko V.I., Benuzh A.A.* Selection of the most appropriate and energy-efficient scheme for Russia between BREEAM and LEED // *Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering*. 2014.

16. *Бабкина Д.О., Янова Р.Ю., Попов А.В., Сорокоумова Т.В.* Международные стандарты «Зеленой архитектуры», перспективы применения и адаптации к условиям России // *Экология урбанизированных территорий*. 2019. № 1. С. 70–74. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11070

17. *Бенуж А.А., Вьюков И.С.* Зарубежный опыт и оценка потенциала использования в России стандарта BREEAM при программе реновации застроенных территорий // *Устойчивое развитие территорий: сборник докладов международной научно-практической конференции*. 2018. С. 103–107.

18. *Бенуж А.А., Морозов Д.Н.* Многокритериальная экологическая оценка при реновации промышленных зон в городах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 7. С. 32–36. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.32-36

19. *Силка Д.Н., Коконова А.А.* Анализ и особенности применения стандартов энергоэффективного экологического строительства в российских условиях // *Вестник Евразийской науки*. 2019. Т. 11. № 1. С. 55.

20. *Радулова Я.И.* Критерии экологичности в формировании пространственных границ в архитектуре и градостроительстве // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2015. № 1 (18). С. 42–46. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.01.7

21. *Жеругов Р.А., Кангезова М.Х., Ланидус А.А.* Автоматизация процесса обеспечения соответствия объекта стандартам «зеленого» строительства // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2019. Т. 46. № 1. С. 132–141. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-132-141

22. *Самойлова Н.А., Жирков О.А., Белкин С.В.* Групповая коммуникация в процессе анализа вариантов градостроительных решений (на примере объектов Московского региона) // *Коммуникология*. 2020. Т. 8. № 2. С. 53–79. DOI: 10.21453/2311-3065-2020-8-2-53-79

Поступила в редакцию 16 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 10 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: Надежда Александровна Самойлова — кандидат технических наук, советник; **Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН)**; 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24; доцент кафедры градостроительства Института строительства и архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 214212, Scopus: 57202819286, ORCID: 0000-0001-8395-7358, ResearcherID: J-6606-2016, IstinaresearcherID: 92608258; SamoylovaNA@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Polozhikhina M.A. The concept of sustainable development of Russia. *Economic and Social Problems of Russia*. 2014; (2):108-125. (rus.).
2. Shubenkov M.V., Shubenkova M.Yu. Biosphere approach to the design of modern urban planning systems. *Science, Education and Experimental Design*. 2020; (1):193-196. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10039 (rus.).
3. Weixi G., Hui L. Sustainable city indexing: towards the creation of an assessment framework for inclusive and sustainable. *Unido. Urban-Industrial Development*. 2017; 2.
4. Ardda N., Mateus R., Bragança L. Methodology to identify and prioritise the social aspects to be considered in the design of more sustainable residential buildings — application to a developing country. *Buildings*. 2018; 8(10):130. DOI: 10.3390/buildings8100130
5. Borrillo-Jiménez M., LopezdeAsiain M., Herrera-Limones R., Lumberras Arcos M. Towards a circular economy for the city of seville: the method for developing a guide for a more sustainable architecture and urbanism (GAUS). *Sustainability*. 2020; 12(18):7421. DOI: 10.3390/su12187421
6. Cole R.J., Valdebenito M.J. The importation of building environmental certification systems: International usages of BREEAM and LEED. *Building Research & Information*. 2013; 41(6):662-676. DOI: 10.1080/09613218.2013.802115
7. Inkoom E.E., Leiringer R. Exploring the dynamic nature of the evolution of Building Environmental Assessment Methods (BEAMs): A call for a diachronic analysis of BEAMs. *Engineering Project Organization Journal*. 2016; 6:2-4:104-114. DOI: 10.1080/21573727.2016.1270204
8. Křídlová Burdová E., Selecká I., Vilčeková S., Burák D., Sedláková A. Evaluation of family houses in Slovakia using a building environmental assessment system. *Sustainability*. 2020; 12(16):6524. DOI: 10.3390/su12166524
9. Leiringer R. Sustainable construction through industry self-regulation: the development and role of building environmental assessment methods in achieving green building. *Sustainability*. 2020; 12(21):8853. DOI: 10.3390/su12218853
10. Plebankiewicz E., Juszczak M., Kozik R. Trends, costs, and benefits of green certification of office buildings: a polish perspective. *Sustainability*. 2019; 11(8):2359. DOI: 10.3390/su11082359
11. Sánchez Cordero A., Gómez Melgar S., Andújar Márquez J.M. Green building rating systems and the new framework level(s): A critical review of sustainability certification within Europe. *Energies*. 2020; 13(1):66. DOI: 10.3390/en13010066
12. Schweber L. The effect of BREEAM on clients and construction professionals. *Building Research and Information*. 2013; 41:129-145. DOI: 10.1080/09613218.2013.768495
13. Trutnev E.K. *Urban regulation: Legal support of urban planning: alternative models of legislation and a program to correct its mistakes*. Moscow, Institute of Urban Economics, 2019; 682. (rus.).
14. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Evaluation of Russia's innovation activity levels in construction. *The 4th International Conference on Civil Engineering and Urban Planning CEUP*. 2015.
15. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Selection of the most appropriate and energy-efficient scheme for Russia between BREEAM and LEED. *Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering*. 2014.
16. Babkina D.O., Yanova R.Yu., Popov A.V., Sorokoumova T.V. International standards of "green architecture", perspectives of application and adaptation to the conditions of Russia. *Ecology of Urban Areas*. 2019; 1:70-74. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11070 (rus.).
17. Benuzh A.A., Vyukov I.S. Foreign experience and assessment of the potential of using the BREEAM standard in Russia in the renovation program of built-up areas. *Sustainable Development of Territories: Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference*. 2018; 103-107. (rus.).
18. Benuzh A.A., Morozov D.N. Multi-criteria environmental assessment when renovating industrial zones on urban areas. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 7:32-36 DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.32-36 (rus.).
19. Silka D.N., Kokonova A.A. Analysis and application features of energy efficient and ecological construction in Russian conditions. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 1:55. (rus.).
20. Radulova Ya.I. Environmental criteria in forming spatial border architecture and urban planning.

Urban Construction and Architecture. 2015; 18(1):42-46. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.01.7 (rus.).

21. Zherugov R.A., Kangezova M.H., Lapidus A.A. Automation of the process of ensuring the conformity of the object to the “green” construction standards. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(1):132-

141. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-132-141 (rus.).

22. Samoilova N.A., Zhirkov O.A., Belkin S.V. Group communication in city planning decisions (on the example urban projects of Moscow region). *Communicology*. 2020; 8(2):53-79. DOI: 10.21453/2311-3065-2020-8-2-53-79 (rus.).

Received July 16, 2021.

Adopted in revised form on September 10, 2021.

Approved for publication on September 10, 2021.

BIONOTES: Nadezhda A. Samoylova — Candidate of Technical Sciences, adviser; **Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN)**; 24 Bolshaya Dmitrovka st., Moscow, 107031, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Urban Planning of the Institute of Civil Engineering and Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 214212, Scopus: 57202819286, ORCID: 0000-0001-8395-7358, ResearcherID: J-6606-2016, IstinaresearcherID: 92608258; SamoylovaNA@gic.mgsu.ru.

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

УДК 624.154+624.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190

Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Подавляющее большинство строительных территорий характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями, представленными наличием в основании слабых грунтов. Встречаются площадки строительства, на которых наблюдается большая толща насыпных грунтов. В данных условиях проектировщиками применяются: закрепление, армирование грунтов; значительное заглубление подземной части зданий и т.д. Приводятся постановки и решения задач взаимодействия железобетонных свай со слабыми грунтами, а также взаимодействия грунтовых свай с насыпными грунтами в составе свайно-плитного фундамента, которые позволяют определить приведенный модуль деформации и коэффициент постели.

Материалы и методы. Для описания изменения касательных напряжений в зависимости от глубины принимался закон в виде $\tau(z) = \tau_0 e^{-\alpha z}$. Решение изложено аналитическим и численным методами. Проведено сравнение полученных результатов аналитическим решением поставленной задачи с результатами, полученными в программном комплексе PLAXIS 3D.

Результаты. Получены закономерности распределения общей нагрузки на свайно-плитный фундамент между свайным полем и ростверком. Аналитические решения подкреплены графической частью, выполненной с помощью программы Mathcad. Показаны зависимости осадки от нагрузки, рассчитанной аналитическим и численным методами. Получено выражение для нахождения напряжений на различных участках ствола сваи и под плитой ростверка. Рассмотрены теоретические и практические аспекты устройства щебеночных свай. Дано теоретическое обоснование уплотнения насыпных грунтов щебеночными сваями по специальной технологии. Определена зависимость для установления приведенного модуля деформации для массивов насыпного грунта, армированного грунтовыми сваями.

Выводы. Сравнительная оценка результатов решений, полученных аналитическим и численным методами, показала хорошую сходимость. Данные решения можно применять для предварительного определения осадки свай в составе свайно-плитного фундамента. Подбор оптимального соотношения длины сваи и ее диаметра позволяет максимально эффективно использовать несущую способность сваи. Для насыпных грунтов, армированных грунтовыми сваями, можно подобрать оптимальный приведенный модуль деформации, варьируя шаг грунтовых свай.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свайно-плитный фундамент, окружающий и подстилающий грунты, насыпные грунты, радиальные напряжения, аналитический метод, НДС ячейки, PLAXIS 3D

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Акулецкий А.С. Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1182–1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190

Stress-strain state of weak and filled soils reinforced with reinforced concrete and soil piles, respectively

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Aleksandr S. Akuleckij

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

ABSTRACT

Introduction. The overwhelming majority of construction areas are characterized by difficult engineering and geological conditions, represented by the presence of weak soils at the base. There are construction sites on which a large thickness of fill soil is observed. In these conditions, designers apply: soil consolidation, soil reinforcement, significant deepening of the underground part of buildings, etc. This article presents the formulation and solution of the problems of interaction of reinforced concrete piles with weak soils, as well as the interaction of soil piles with bulk soils as part of a pile-slab foundation, which allow one to determine the reduced deformation modulus and the bedding value.

Materials and methods. To describe the change in shear stresses depending on depth, a law was adopted in the form $\tau(z) = \tau_0 e^{-\alpha z}$. The solution is presented by analytical and numerical methods. The results obtained were compared by the analytical solution of the problem with the results obtained in the PLAXIS 3D software package.

Results. Regularities of the distribution of the total load on the pile-slab foundation between the pile field and the grillage have been obtained. The analytical solutions in the article are supported by the graphical part, performed using the Mathcad program. Numerical simulation of the problem was carried out in the PLAXIS 3D software package. The dependence of the settlement on the load, calculated by analytical and numerical methods, is shown. An expression is obtained for defining the stresses in different sections of the pile shaft and under the grillage slab. The theoretical and practical aspects of the construction of crushed stone piles are considered. The theoretical substantiation of compaction of bulk soils with crushed stone piles using a special technology is given. A dependence is obtained for determining the reduced modulus of deformation for bulk soil mass reinforced with soil piles.

Conclusions. Comparative evaluation of the results of solutions obtained by analytical and numerical methods showed good convergence. The solutions obtained can be used to preliminary determination of the settlement of piles as part of a pile-slab foundation. Selection of the optimal ratio of the pile length and its diameter allows the most effective use of the bearing capacity of the pile. For bulk soils, reinforced with soil piles, it is possible to select the optimal reduced modulus of deformation by varying the pitch of the soil piles.

KEYWORDS: pile-slab foundation, surrounding and underlying soils, fill soils, radial stresses, analytical method, SSS of cells, PLAXIS 3D

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Akuletkij A.S. Stress-strain state of weak and filled soils reinforced with reinforced concrete and soil piles, respectively. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1182-1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство строительных территорий характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями, представленными наличием в основании слабых грунтов. В данных условиях проектировщиками применяются: закрепление грунтов [1–6], армирование грунтов [7–10], значительное заглубление подземной части зданий и т.д. Но в качестве основного типа фундамента на таких площадках рассматривают свайный фундамент [11–19]. При взаимодействии свай большой длины с окружающим и подстилающим грунтами в составе свайно-плитного фундамента возникает сложное и неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС), на которое существенное влияние оказывает шаг ($2b$), диаметр ($d = 2a$), длина свай (l) (рис. 1) [20]. При увеличении количества свай, оценка НДС системы ростверк – свая – грунтовый массив осложняется, в том числе под нижним концом свай при взаимодействии с подстилающими слоями и в контактной зоне между ростверком и грунтом. Количественная оценка НДС показывает закономерности распределения

внешней нагрузки на свайно-плитный фундамент между свайным полем и ростверком, а также позволяет определить его осадку.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Напряженно-деформированное состояние слабых грунтов, армированных железобетонными сваями

В настоящей статье приводятся постановки и решения по количественной оценке НДС ячейки свайно-плитного фундамента с учетом устройства свай в грунтовом массиве. Это дает возможность определить закономерности распределения общей нагрузки на фундамент между свайным полем и ростверком в межсвайном пространстве, а также выявить осадку свай в составе свайно-плитного фундамента.

Постановка и решение задачи аналитическим методом

Рассмотрим НДС секции свайно-плитного фундамента с заданными свойствами грунта, а также размерами и граничными условиями (рис. 1). Полагаем, что трение между секциями отсутствует и жесткость ростверка и свай значительно превышает жесткость грунта:

$$E_{\text{рост.}} \gg E_{\text{гр.}}, E_{\text{св.}} \gg E_{\text{гр.}} \quad (1)$$

Отмечаем, что взаимное перемещение свай и грунтов происходит без возможности проскальзывания. При этом возникают реактивные напряжения под ростверком, в уровне оголовка свай, на боковой поверхности и под нижним концом свай, которые необходимо определить (рис. 2).

Начало координат поставим в уровень пяты свай и направим ось z вверх. На стволе свай выделим элементарный слой высотой dz , показан штриховкой на рис. 2. Нормальные напряжения σ_z в данном элементарном слое появляются при приложении распределенной нагрузки p (кПа) на расчетную ячейку. На боковой поверхности свай возник-

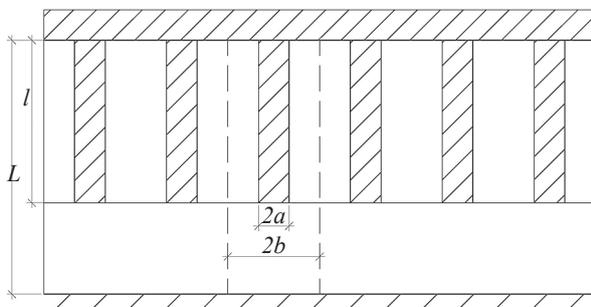


Рис. 1. Схема для выделения расчетной ячейки свайно-плитного фундамента

Fig. 1. Scheme for highlighting the design cell of the pile-slab foundation

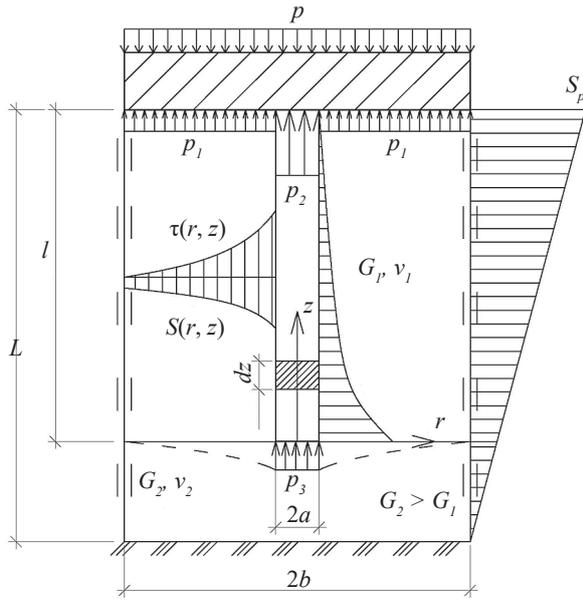


Рис. 2. Расчетная схема для определения НДС ячейки
 Fig. 2. Calculation scheme for determining the SSS of a cell

кают касательные напряжения $\tau(z)$. Исходя из этого можно записать условие равновесия элементарного слоя сваи длиной dz :

$$2\pi\alpha\tau(z)dz = \pi\alpha^2 d\sigma_z. \quad (2)$$

Отсюда получаем:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2}{\alpha}\tau(z). \quad (3)$$

Закон изменения касательных напряжений в зависимости от глубины принимаем в виде:

$$\tau(z) = \tau_0 e^{-\alpha z}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), получаем:

$$\sigma_z = \frac{2\tau_0}{\alpha} \int e^{-\alpha z} dz = -\frac{2\tau_0}{\alpha\alpha} e^{-\alpha z} + C. \quad (5)$$

Константу C находим из граничных условий на уровне пяты сваи. При $z = 0$, где $\sigma(0) = p_3$ — давление под подошвой сваи (рис. 2). Окончательно получаем:

$$\sigma_z = -\frac{2\tau_0}{\alpha\alpha} e^{-\alpha z} + p_3 + \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha}. \quad (6)$$

С помощью полученного выражения определим осадку сваи:

$$S_c(z) = \int \frac{\sigma_z dz}{E_c} = \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha^2 E_c} e^{-\alpha z} + p_3 \frac{z}{E_c} + \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha} \frac{z}{E_c} + C_1, \quad (7)$$

где E_c — модуль упругости ствола сваи.

Постоянную интегрирования C_1 находим из условия $z = 0$. Осадка сваи равна осадке круглого штампа. В таком случае получаем окончательное выражение для нахождения осадки сваи в зависимости от глубины z :

$$S_c(z) = \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha^2 E_c} e^{-\alpha z} + p_3 \frac{z}{E_c} + \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha} \frac{z}{E_c} + p_3 \frac{\pi\alpha(1-\nu_2)K}{4G_2} - \frac{2\tau_0}{\alpha\alpha^2 E_c}, \quad (8)$$

где ν_2 и G_2 — деформационные параметры грунта под нижним концом сваи; $K \leq 1$ — коэффициент, учитывающий глубину приложения нагрузки на пяту сваи.

Граничные условия для рассматриваемой ячейки отличаются от условий для одиночной сваи [21]. Примем для ячейки свободное вертикальное перемещение, а на дне ячейки полное отсутствие перемещений.

В таком случае закон распределения касательных напряжений $\tau(z, r)$ меняется по радиусу r следующим образом [22]:

$$\tau(r) = \tau_a (b-r)^2 / (b-a)^2, \quad (9)$$

где τ_a — касательные напряжения на контуре сваи; $a \leq r \leq b$, $\tau(a) = \tau_a$, $\tau(b) = 0$.

Сдвиговую деформацию элементарного слоя грунта вокруг сваи можно определить по следующей зависимости:

$$\frac{dS}{dr} = \gamma(r) = -\frac{\tau(r)}{G_1}, \quad (10)$$

где S и G_1 — осадка и модуль сдвига окружающего грунта соответственно.

Подставляя $\tau(r)$ из выражения (9) в (10), получаем:

$$S(z, r) = -\int \frac{\tau(z)}{G_1} \frac{(b-r)^2}{(b-a)^2} = \tau(z) \frac{(b-r)^3}{3G_1(b-a)^2} + C_2, \quad (11)$$

Константу C_2 найдем при $r = b$, т.е. $S(b, r) = S_p \left(1 - \frac{z}{L}\right)$ — изменение на границе ячейки принято линейным (рис. 2).

Осадка столба грунта высотой L от действия распределенной нагрузки p_1 под ростверком:

$$S_p = \frac{p_1 \beta L}{E}, \quad (12)$$

$$\text{где } E = \frac{L}{l/E_1 + (L-l)/E_2}. \quad (13)$$

Тогда максимальная осадка на поверхности сваи:

$$S(z) = \tau(z) \frac{(b-a)}{3G_1} + S_p \left(1 - \frac{z}{L}\right). \quad (14)$$

В соответствии с расчетной схемой (рис. 2) имеются четыре неизвестных компоненты НДС: p_1, p_2, p_3, τ_0 . Для определения неизвестных потребуется четыре уравнения.

Исходя из равновесия всей ячейки запишем:

$$\pi b^2 p = \pi a^2 p^2 + \pi(b^2 - a^2)p_1, \quad (15)$$

где p — приложенная нагрузка на ячейку.

Условие равновесия свай:

$$\pi a^2 p_2 = \pi a^2 p_3 + 2\pi a l \int_0^l \tau(z) dz. \quad (16)$$

При условии, что $\tau_z = \tau_0 e^{-\alpha z}$, и после интегрирования получаем:

$$\pi a^2 p_2 = \pi a^2 p_3 - \tau_0 \frac{(e^{-\alpha l} - 1)}{\alpha}. \quad (17)$$

Следующим условием является равенство осадок грунта (12) и свай (8) на уровне пяты свай ($z = 0$):

$$\tau_0 \frac{(b-a)}{3G_1} + S_p \left(1 - \frac{l}{L}\right) = p_3 \frac{\pi a(1-\nu_2)K}{4G_2}. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi b^2 p = \pi a^2 p_2 + \pi(b^2 - a^2)p_1 \\ \pi a^2 p_2 = \pi a^2 p_3 - \tau_0 \frac{(e^{-\alpha l} - 1)}{\alpha} \\ \tau_0 \frac{(b-a)}{3G_1} + S_p \left(1 - \frac{l}{L}\right) = p_3 \frac{\pi a(1-\nu_2)K}{4G_2} \\ \tau_0 \frac{e^{-\alpha l}(b-a)}{3G_1} + S_p = \frac{2\tau_0 l}{\alpha \alpha E_c} + \frac{p_3 l}{E_c} + \frac{2\tau_0}{\alpha \alpha^2 E_c} e^{-\alpha l} + p_3 \frac{\pi a(1-\nu_2)K}{4G_2} - \frac{2\tau_0}{\alpha \alpha^2 E_c} \end{array} \right. \quad (20)$$

Решение системы уравнений можно получить с помощью программного комплекса Mathcad.

Осадку свайно-плитного фундамента определим по формуле:

$$S = \frac{p\beta_g L}{E} \left(1 - \frac{l}{L}\right) + \frac{(p_2 - p_3)\beta_c l}{E_c} + p_3 \frac{\pi a(1-\nu_2)K}{4G_2}, \quad (21)$$

где β_g — коэффициент невозможности бокового расширения грунта; β_c — коэффициент невозможности бокового расширения материала свай.

Полученное решение можно использовать для определения приведенного модуля деформации массива грунта с учетом устройства свай, приравнивая осадку ростверка и осадку рассматриваемой системы. Также появляется возможность определения коэффициента постели для решения практических инженерных задач.

Постановка и решение задачи численным методом

Решение поставленной задачи было также получено численным методом конечных элементов с помощью программы PLAXIS 3D, которая предназначена в том числе для количественной оценки НДС массивов грунта (рис. 3).

Ниже приведены результаты определения осадки свай по формуле (21) и численным методом (рис. 4) при:

$$a = 0,5 \text{ м}; b = 2,0 \text{ м}; l = 30 \text{ м}; L = 40 \text{ м}; E_1 = 30 \text{ МПа}; E_2 = 40 \text{ МПа}.$$

Напряженно-деформированное состояние насыпных грунтов, армированных грунтовыми сваями

Большое количество площадок характеризуется наличием большой толщи насыпных грунтов.

Последним уравнением примем условие равенства осадок грунта (12) и свай (8) в уровне оголовка свай ($z = l$):

$$\tau_0 \frac{e^{-\alpha l}(b-a)}{3G_1} + S_p = \frac{2\tau_0 l}{\alpha \alpha E_c} + \frac{p_3 l}{E_c} + \frac{2\tau_0}{\alpha \alpha^2 E_c} e^{-\alpha l} + p_3 \frac{\pi a(1-\nu_2)K}{4G_2} - \frac{2\tau_0}{\alpha \alpha^2 E_c}. \quad (19)$$

Полученные выше четыре уравнения, объединенные в систему уравнений, позволят найти неизвестные компоненты НДС:

Основными мероприятиями, которые позволяют их использовать в качестве основания, являются: поверхностное уплотнение, глубинное уплотнение грунтовыми сваями, прорезка грунтов свайными фундаментами.

При глубинном уплотнении насыпных грунтов используют буронабивные грунтовые сваи, которые имеют экономическую выгоду по сравнению с железобетонными сваями. Данные сваи совместно с уплотненным окружающим грунтом (ячейка) служат несущими элементами, способными воспринимать значительные нагрузки. В инженерной практике применяют разные технологии изготовления свай из крупнозернистого и крупнообломочного грунтов. В одном из способов используется домкрат, уплотняющий значительным усилием (до 200 т) порцию материала свай в забой лидирующей скважины. В результате возникают существенные радиальные и тангенциальные напряжения, которые способствуют уплотнению насыпных грунтов. При этом происходит уплотнение не только окружающего грунта, но и уплотнение самого тела свай.

Подбор длины щебеночной свай выполняется на всю глубину насыпных грунтов. По результатам расчета подбирается шаг свай. Так как изготовление грунтовых свай оказывает значительное влияние на грунтовый массив, рекомендуется назначать расстояние между сваями не более трех диаметров инструмента. Равномерная расстановка свай обеспечивает получение одинаковых свойств уплотненного основания по всей площади строительства. На рис. 5 показано типовое расположение грунтовых свай.

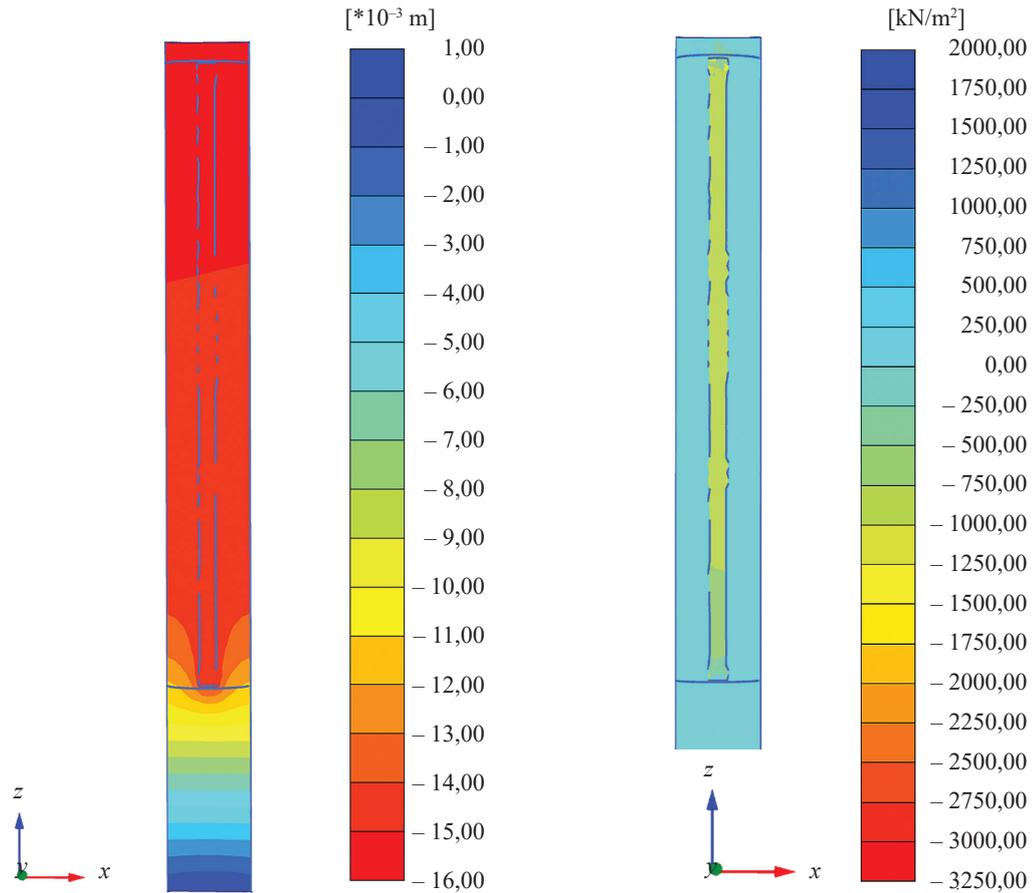


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений и вертикальных напряжений в расчетной ячейке при $p = 50$ кПа

Fig. 3. Isofields of vertical displacements and vertical stresses in a computational cell at $p = 50$ kPa

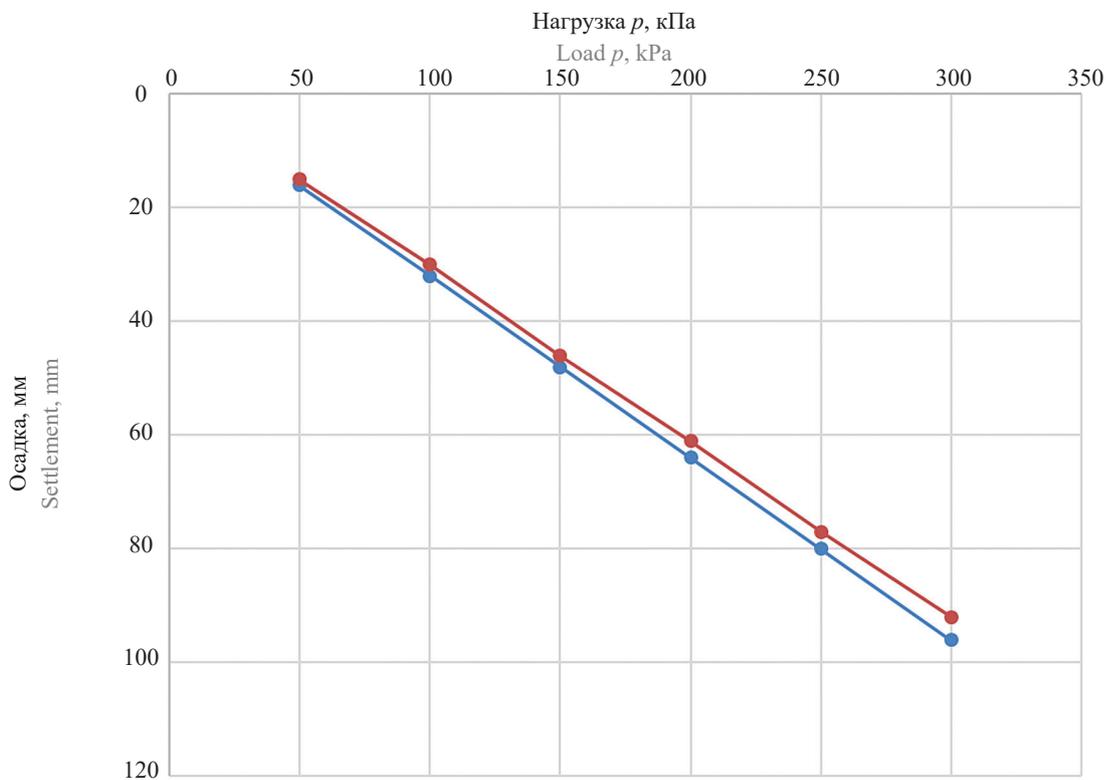


Рис. 4. Графики зависимости осадки от нагрузки, рассчитанной аналитическим и численным методами

Fig. 4. Graphs of dependence of settlement on load, calculated by analytical and numerical methods

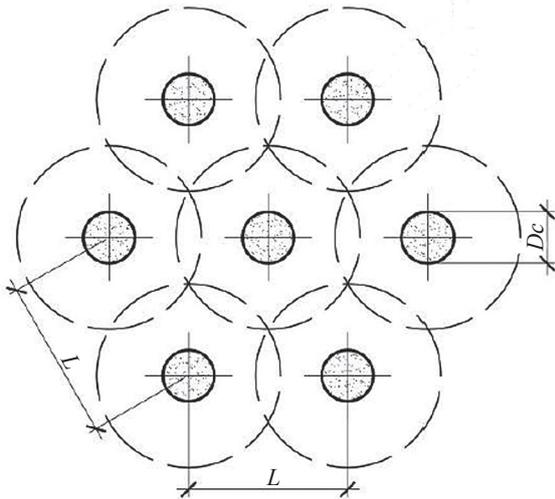


Рис. 5. Схема шахматного расположения свай

Fig. 5. Scheme of the staggered arrangement of piles

При изготовлении щебеночной свай происходит расширение лидирующей скважины, возникает НДС, отличающееся от природного (рис. 6).

Решение данной задачи сводится к решению дифференциального уравнения вида:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0, \quad (22)$$

где u — перемещения в радиальном направлении, при этом:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right), \quad \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} \right), \quad (23)$$

Приведем окончательный вид уравнения:

$$\sigma_r(r) = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 + \nu + \frac{r_2^2}{r^2} (1-\nu) \right);$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 + \nu - \frac{r_2^2}{r^2} (1-\nu) \right);$$

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \frac{2E}{1-\nu} \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2};$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right);$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right);$$

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \frac{2u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2},$$

где u_k — заданное перемещение.

Величина расширения скважины определяется исходя из тех деформационных характеристик насыпного грунта, которые необходимо получить для безопасного эксплуатации здания.

Рассмотрим взаимодействие щебеночной свай с окружающим и подстилающим грунтами и ростверком в составе свайно-плитного фундамента. Предполагается свободное перемещение по внешнему контуру и условие компрессионного сжатия свай и окружающего грунта (рис. 7).

Как известно, при статическом воздействии на ростверк нагрузкой p происходит ее перераспределение между свайей и окружающим грунтом.

Запишем условие равновесия:

$$p = p_c \omega + p_r (1 - \omega), \quad (25)$$

где $\omega = a^2 / b^2$, a и b — радиусы свай и грунтового цилиндра.

Запишем условие равенства осадок:

$$S_p = S_c = S_r, \quad (26)$$

$$m_c p_c = m_p p_p = m_r p_r, \quad (27)$$

где m_c и m_r — коэффициенты относительной сжимаемости свай и грунта соответственно.

Данные выражения приводят к зависимостям:

$$p_c = p_p \frac{E_c}{E_c \omega + E_r (1 - \omega)};$$

$$p_r = p_p \frac{E_r}{E_c \omega + E_r (1 - \omega)}. \quad (28)$$

При этом выражения для нахождения приведенного модуля деформации:

$$E_{mp} = E_c \omega + E_r (1 - \omega). \quad (29)$$

Полученное выражение для определения приведенного модуля армированного массива позволяет подобрать оптимальное значение для восприятия внешней нагрузки, варьируя шаг щебеночных свай.

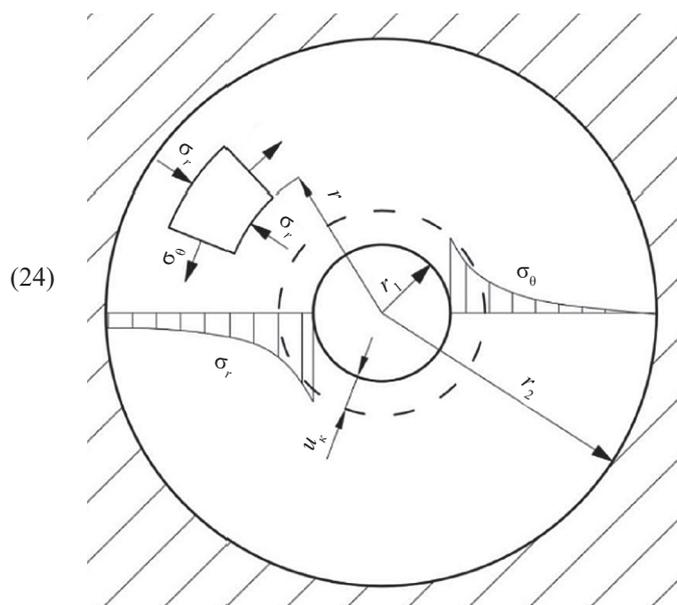


Рис. 6. Схема расширения диаметра скважины при изготовлении щебеночной свай

Fig. 6. Diagram of the expansion of the borehole diameter in the manufacture of crushed stone piles

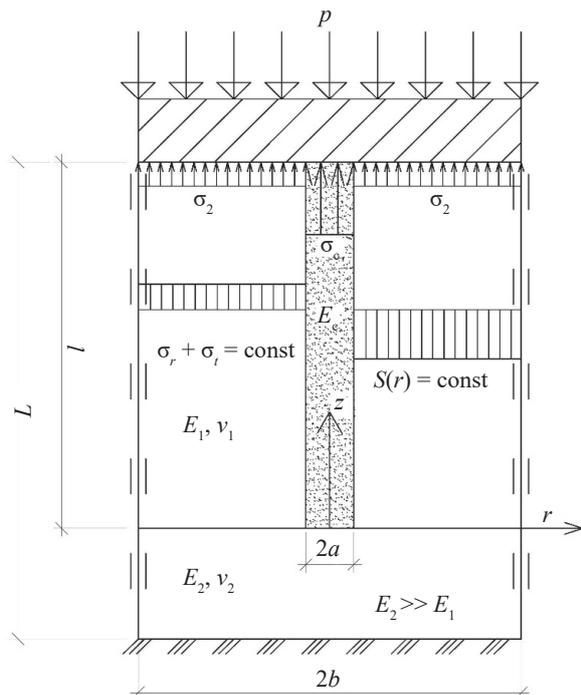


Рис. 7. Расчетная схема щебеночной сваи с окружающим грунтом и ростверком по схеме «свая – стойка»

Fig. 7. Design scheme of a crushed stone pile with surrounding soil and grillage according to the “rack – pile” scheme

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате решений были получены зависимости осадки свайно-плитного фундамента от нагрузки

при расчете по формуле (21) и в программном комплексе PLAXIS 3D. Сравнительная оценка результатов решений, полученных аналитическим и численным методами, показала хорошую сходимость (рис. 4). Определены закономерности распределения общей нагрузки на свайно-плитный фундамент между свайным полем и ростверком в межсвайном пространстве. Дано расчетно-теоретическое обоснование технологии уплотнения насыпных грунтов щебеночными сваями. Рассмотрено решение взаимодействия сжимаемой щебеночной сваи с окружающим насыпным грунтом и ростверком.

Полученные решения позволяют подобрать оптимальное соотношение длины сваи и ее диаметра для наиболее эффективного использования несущей способности грунтов под пятой сваи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При взаимодействии свайно-плитного фундамента с окружающим и подстилающим грунтами возникает сложное НДС, при котором происходит общая нагрузка на фундамент между свайным полем и ростверком в межсвайном пространстве. Полученные зависимости перераспределения внешней нагрузки на свайно-плитный фундамент между свайей и ростверком дают возможность оптимально подобрать шаг свай, при котором происходит наиболее эффективное включение в работу и свай, и ростверка. Данное решение позволяет находить не только осадку фундамента, но и напряжения на различных участках ствола сваи и под плитой ростверка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абелев М.Ю., Абелев К.М.* Геотехнические исследования площадок строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами // *Геотехника*. 2010. № 6. С. 30–33.
2. *Ибрагимов М.Н., Семкин В.В.* Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. М.: Изд-во АСВ, 2012. 254 с.
3. *Бройд И.И.* Струйная геотехнология: учебное пособие. М.: Ассоц. строит. вузов, 2004. 440 с.
4. *Малинин А.Г.* Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 165 с.
5. *Garassimo A.* Design Procedures for Jet-Grouting // *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. *Yahiro T., Yoshida H., Nishi K.* The development and application of Japanese grouting system // *Water Power and Dam Construction*. 1975. Issue 2.
7. *Караулов А.М.* Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельно стоящих фундаментов транспортных сооружений // *Вестник ТГАСУ*. 2012. № 2 (35). С. 183–190.
8. *Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатын П.В.* Исследование вертикально армированных основа-

ний плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробация их результатов в производственных условиях // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2015. С. 40–47.

9. *Нуждин М.Л.* Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2019. Т. 10. № 3. С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01

10. *Мирсаяпов И.Т., Шарафутдинов Р.А.* Расчетная модель несущей способности и осадок грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными элементами // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 3 (37). С. 179–187.

11. *Тер-Мартirosян А.З., Ле Дык Ань, Манукян А.В.* Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность сваи // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 5. С. 655–664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664.

12. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 380 с.
13. Готман Н.З., Сафиуллин М.Н. Расчет и проектирование усиления плитного фундамента грунтоцементными сваями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 4. С. 64–73. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.07
14. Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 119–132.
15. Уткин В.С. Расчет надежности висячих свай по критерию несущей способности грунта основания фундамента // Строительство: наука и образование. 2018. № 4 (30). С. 1. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1
16. Wei Dong Guo. Theory and Practice of Pile Foundations. CRC Press, 2019. 576 p.
17. Prakash S., Sharma H.D. Pile foundation in engineering practice. John Wiley and Sons, Inc, 1991. 768 p.
18. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. Piles and Pile Foundations. CRC Press, 2012. 296 p.
19. Madabhushi G., Knappett J., Haigh S. Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils. CRC Press, 2009. 232 p. DOI: 10.1142/P628
20. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Занг Нам. Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 3–14.
21. Тер-Мартirosян З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие свай большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 2. С. 168–175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175
22. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2020. 952 с.

Поступила в редакцию 10 сентября 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

Армен Завенович Тер-Мартirosян — доктор технических наук, исполняющий обязанности директора Института строительства и архитектуры, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-8787-826X; РИНЦ ID 496327; gic-mgsu@mail.ru;

Александр Сергеевич Акулецкий — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-5752-1120, РИНЦ ID: 981728; akula.92@inbox.ru.

REFERENCES

1. Abelev M. Y., Abelev K.M. Geotechnical studies of construction sites on soft water-saturated clay soils. *Geotechnics*. 2010; 6:30-33. (rus.).
2. Ibragimov M.N., Semkin V.V. *Consolidation of soils by injection of cement mortars*. Moscow, Publishing house ASV, 2012; 254. (rus.).
3. Broyd I.I. *Jet geotechnology*. Moscow, Publishing house of Assots. builds. universities, 2004; 440. (rus.).
4. Malinin A.G. *Jet grouting of soils*. Moscow, Stroyizdat, 2010; 165. (rus.).
5. Garassimo A. Design Procedures for Jet-Grouting. *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. Yahiro T., Yoshida H., Nishi K. The development and application of Japanese grouting system. *Water Power and Dam Construction*. 1975; 2.
7. Karaulov A.M. Practical method for calculation of vertical reinforced beds of strip foundations of isolated transport facilities. *Vestnik of TSUAB*. 2012; 2(35):183-190. (rus.).
8. Kravtsov V., Jakunenkov S., Lapatsin P. Research of vertical reinforced by soil-concrete micropiles slab foundations' ground bases and testing results in industrial practice. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2015; 40-47. (rus.).
9. Nuzhdin M.L. Experimental studies of pile foundation ground base reinforced with hard inclusions. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(3):5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01 (rus.).
10. Mirsayapov I.T., Sharafutdinov R.A. The computational model of bearing capacity and foundation of soil sediment, reinforced by vertical and horizontal elements. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 3(37):153-158. (rus.).
11. Ter-Martirosyan A.Z., Le Duc Anh, Manuky-an A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing

capacity of a single pile. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(5):655-664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664 (rus.).

12. Bartolomey A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. *Pile foundation settlement forecast*. Moscow, Stroyizdat, 1994; 380. (rus.).

13. Gotman N.Z., Safiullin M.N. Calculation and design of reinforcing slab foundations with soil-cement piles. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017; 8(4):64-73. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.07 (rus.).

14. Doroshkevich N.M., Znamensky V.V., Kudinov V.I. Engineering methods for calculating pile foundations for various loading schemes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006; 1:119-132. (rus.).

15. Utkin V.S. Friction pile reliability analysis with respect to the foundation soil bearing capacity. *Construction: Science and Education*. 2018; 4(30):1. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1 (rus.).

16. Wei Dong Guo. *Theory and Practice of Pile Foundations*. CRC Press, 2019; 576.

17. Prakash S., Sharma H.D. *Pile foundation in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc, 1991. 768 p.

18. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. *Piles and Pile Foundations*. CRC Press, 2012; 296.

19. Madabhushi G., Knappett J., Haigh S. *Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils*. CRC Press, 2009; 232. DOI: 10.1142/P628

20. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Giang Nam. Interaction of long piles with a heterogeneous massif taking into account the nonlinear and rheological properties of soils. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2008; 2:3-14. (rus.).

21. Ter-Martirosyan Z.G., Akuletskii A.S. Interaction between a long pile and multi-layer underlying soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):168-175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168175 (rus.).

22. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil Mechanics*. Moscow, ASV Publ., 2020; 952. (rus.).

Received September 10, 2021.

Adopted in revised form on September 24, 2021.

Approved for publication on September 24, 2021.

BIONOTES: **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Director of the Institute of Construction and Architecture, Head of Research and Educational Center "Geotechnics"; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5034, ORCID: 0000-0001-8787-826X, ResearcherID: Q-8635-2017; gic-mgsu@mail.ru;

Aleksandr S. Akuleckij — postgraduate student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5752-1120, ID RISC: 981728; akula.92@inbox.ru.

Принципы совершенствования структуры композитных изделий, основанные на изучении биотехнологий и биоматериалов

А.Н. Полилов¹, Н.А. Татусь^{1,2}

¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН); г. Москва, Россия;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен аналитический обзор методов использования решений, наблюдаемых в природе, для проектирования конструкций из пластиков, армированных волокнами, в частности, с применением криволинейных траекторий волокон, располагающихся по заданным, рациональным траекториям. В первом разделе приводятся общие сведения о моделях различных структурных уровней и некоторые подходы микромеханики композитов.

Материалы и методы. В разделах 2–7 рассматриваются: анализ эффективных для торможения трещин упругопрочностных свойств древесины и композитов; методы построения криволинейных траекторий волокон вокруг отверстия; технологии изготовления мест крепления, в которых отверстия сформированы с помощью криволинейных траекторий волокон; «навеянные природой» принципы проектирования трубных композитных конструкций, аналогичных по строению многозвенным стеблям бамбука; примеры эффективного применения волокнистых композитов в упругих элементах типа листовых рессор; аддитивные технологии трехмерной печати деталей из волокнистых композитов с укладкой волокон по рассчитанным траекториям.

Результаты. В каждом разделе приводятся выводы, связанные с особенностями расчета и проектирования конструкций из волокнистых композитов: для повышения трещиностойкости волокнистых композитов необходимо повышать сдвиговые характеристики связующего и стремиться к рациональным свойствам, созданным природой в древесине; максимальное напряжение «в расчете на волокно» при рациональной структуре армирования становится примерно в 3–4 раза меньше, чем при однородной прямолинейной укладке; рациональное армирование приводит к существенному снижению локальных напряжений в расчете на волокно, исключению расщеплений и повреждений волокон и повышению несущей способности соединения; показано, что кольца бамбука располагаются так, чтобы не позволить стволу расщепиться от сжимающих напряжений при изгибе и касательных напряжений при кручении ствола под действием ветровой нагрузки; проанализирована связь равнопрочного профилирования листов с правилом Леонардо для ветвления кроны деревьев; проанализирована роль композитных технологий в современном машиностроении, в частности, при создании композитных конструкций в условиях открытого космоса.

Выводы. Приведен анализ задач макромеханики волокнистых композитов. Три наиболее перспективных и связанных между собой направления в макромеханике композитов требуют дальнейших исследований: биомеханика прочности, компьютерное моделирование рациональных структур и технологическая механика композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод, подсказанный природой, биомиметика, волокнистый композит с полимерной матрицей, структура древесины, структура сучка, обтекание волокнами отверстия, углепластик, стеклопластик, криволинейное армирование, способы крепления композитных деталей, масштабный эффект прочности, 3D-печать, профилированные композитные элементы, ветвление, коэффициент снижения прочности, коэффициент концентрации напряжений, рациональное проектирование композитных конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полилов А.Н., Татусь Н.А. Принципы совершенствования структуры композитных изделий, основанные на изучении биотехнологий и биоматериалов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1191–1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1191-1216

Experience nature as a basis for building strong composite structures

Alexander N. Polilov¹, Nikolay A. Tatus^{1,2}

¹ *Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS; Moscow, Russian Federation;*

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

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted an analytical overview of the methods of applying the Nature solutions for designing structures made of plastics reinforced with fibers, in particular, using rational curved fiber trajectories. The first section provides an overview of different structural models and some approaches to the micromechanics of composites.

Materials and methods. Sections 2-7 discuss: analysis of rational elastic-strength properties of wood and composites for crack arrest by weak interface; methods for constructing curved paths of fibers of “flowing holes”; analyzes the applied and

promising technologies for manufacturing attachment points, in which holes are formed using curvilinear fiber paths; “nature-inspired” principles of optimal design of pipe composite structures similar in structure to ladder of bamboo stalk; examples of the effective use of fibrous composites in elastic elements such as leaf springs; developing additive technologies for 3D printing of fiber composite parts with fiber laying along calculated trajectories.

Results. Each section of the article presents conclusions related to the peculiarities of composites structures calculation and design: calculations show that in order to increase the crack resistance of fibrous composites, it is necessary to significantly increase the shear characteristics of the binder and strive for rational properties created by Nature in wood; as a result of the calculation, it turns out that the maximum stress per fiber at the optimal reinforcement structure becomes about 3–4 times less than with a uniform rectilinear laying; rational reinforcement leads to a significant reduction in local stresses per fiber, elimination of splits and damages of fibers and an increase in the carrying capacity of the assembly; it has been shown that the bamboo rings are arranged to prevent the barrel from splitting from bending compressive stresses and tangential stresses when the barrel is twisted by wind load; analyzed the relationship of equal-strength profiling with Leonardo’s rule for tree crown branching. The works on creation of bio-similar shape and structure of curvilinear reinforcement of specimens for correct determination of unidirectional composites strength at tension along fibres were discussed; analyzed the role of composite technologies in modern mechanical engineering, in particular, in the creation of composite structures in open space.

Conclusions. The article is devoted to the analysis of the tasks of fibrous composites macromechanics, therefore, in the opinion of the authors, the three most promising and related areas in macromechanics of composites that require further research are biomechanics of strength, computer modeling of optimal structures and technological mechanics of composites.

KEYWORDS: bio-inspired method; bio-mimetics; FRP (fiber-reinforced plastic); wood structure; knot structure; fibers following around the hole; CFRP; GFRP; curvilinear reinforcement; methods of composite members connection; scale effect of strength; 3D printing; shaped composite elements; branching; strength reduction factor; stress concentration factor; optimum design of composite constructions

FOR CITATION: Polilov A.N., Tatus' N.A. Experience nature as a basis for building strong composite structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9): 1191-1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1191-1216 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Примеры использования природных решений в строительстве и технике и, в частности, в проектировании композитных конструкций

Большинство технических решений было подсказано человеку природой, хотя древние люди считали, что это подсказки бога. Например, огонь — не от попавшей в дерево молнии, а от Прометея. Но не бог, а скорее, паук научил человека плести сети для ловли рыбы, и, конечно, не случайно в наши дни вновь возрос научный и прикладной интерес к паутине [1]: оказалось, что она превосходит сталь по удельной прочности (отнесенной к удельному весу).

С развитием науки и техники интерес к изучению природных конструкций и механизмов возрастает периодически, по мере появления новых средств и технологий исследований. Весьма сложно задуматься о строении клетки, не видя ее, но кто-то, посмотрев через увеличивающую объект сосульку, догадался сделать стеклянную линзу, затем — очки, микроскоп. Со временем изучение живой природы (бактерии, вирусы) потребовало более совершенных средств: электронные, сканирующие, растровые, туннельные микроскопы.

Также и с волокнистыми композитными материалами. Аналог структуре металлических сплавов, которую человек столетиями усовершенствовал с помощью научных и технологических методов, найти в природе трудно, но после открытия Аланом Гриффитсом очень высокой прочности тончайших волокон, с появлением волокнистых композитов интерес к оптимальной, совершенствовавшейся миллионы лет структуре прочных живых материалов (древесина, кость, дентин, раковина, панцирь краба [2]) стал естественным.

Открытие резкого увеличения прочности стеклянных волокон при уменьшении их диаметра привело к революционному изменению конструкционного материаловедения. И вот на смену металлам в строительных конструкциях приходят волокнистые композиты: железная арматура заменяется на стеклопластиковую, волокнами армируются бетонные конструкции. С развитием технологической механики композитов исследователи все чаще оглядываются на природу, изучая ее конструкции. Почему паутина тонкая и прочная [1], к тому же получается практически без затрат энергии? К тому же она превосходит медь и по теплопроводности, и по электропроводности! О тончайших и незаменимых для одежды шелковых нитях можно не говорить.

Как спроектированы крепления ветки к стволу в строении дерева? Можно сломать ветку, можно распилить ствол, но никакими усилиями нельзя оторвать ветку от ствола. Соединение прочнее самих деталей! О таких способах крепления конструкторам-композитчикам пока можно только мечтать. На изучение, достижение и копирование подобных свойств в искусственных конструкционных композитах направлены усилия многих ученых [3] во всех развитых странах мира. Анализ подобным исследований и посвящена данная обзорная статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Моделирование на разных структурных уровнях

Для изучения волокнистых композитов используются различные научные подходы, сильно отличающиеся друг от друга. При одном и том же объекте рассмотрения (композитный «материал-конструкция») подходы различаются предметом исследования, то есть учеными применяются разные модели

и соответствующие им уравнения. Задачи, приводящиеся в настоящей статье о деформировании, разрушении и проектировании структуры композитов, в основном относятся к моделям материала, занимающим промежуточное положение между «микроструктурными» и «макромеханическими» моделями.

Под «макромеханикой композитов» обычно подразумевается (раздел 6) моделирование поведения под нагрузкой композитного элемента, как сплошного анизотропного тела с эффективными упругими характеристиками квазиоднородного аналога.

Структурные модели, описывающие поведение отдельного волокна, погруженного в матрицу, называют «микромеханикой композитов» (раздел 1). *Возможно, термин «микромеханика» правильнее было применять для изучения моделей, которые связаны не со структурной неоднородностью, а с масштабным эффектом прочности (Scale Effect), когда в композитных структурах при неизменном геометрическом подобии с изменением абсолютных размеров компонентов меняются свойства материала и характер разрушения. Наиболее ярко масштабный эффект проявляется при уменьшении диаметра волокон: прочность при этом возрастает многократно. А, например, исследование структуры железобетона, которая подобна композитам, вряд ли можно отнести к области микромеханики.*

В том случае, когда в качестве характерного структурного элемента берут не просто волокно, а жгут (трехмерная печать), ленту (намотка) или монослой, препрег (выкладка), применяемые для расчета модели (послойный метод), называют «мини-механикой» (разделы 3, 4). Заимствуя термин у модельеров женской одежды, мы предлагаем для описания структурного уровня моделей, приведенных в разделах 2, 5 настоящей статьи, использовать термин «миди-механика композитов» — нечто среднее между мини и макси. По сути, расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) проводится для материала, который однороден и ортотропен, но при исследовании механизмов разрушения происходит учет наличия «слабых направлений» вдоль границ раздела «волокно-матрица» и слабых поверхностей между слоями. Именно эту «слабость» можно наблюдать после разрушения полимерных волокнистых композитов и древесины (фанеры): материал расслаивается (по границе слоев) или расщепляется (вдоль волокон).

Понимая особенности разрушения композитных элементов, можно проводить анализ критериев прочности композитов, который оказывается не сложнее, чем для изотропных материалов, металлов. Особенности разрушения слоистых волокнистых композитных конструкций проявляются практически в каждой из приведенных задач.

Микромеханика древесины и композитов

Древесные конструкции, а также бамбуки обладают сложной, иерархической структурой [3–7].

Существует большое количество исследований непосредственно таких структур, а также структурных микромеханических моделей [8]. Без углубления в тонкости таких моделей стоит отметить работы Г.А. Ванина (Ван Фо Фы) [9, 10] и других авторов [11–13], в которых изложены подходы к построению точных решений задач теории упругости для периодических волокнистых структур и построены основы создания варианта градиентной теории упругости, позволяющей строить решения задач для волокнистой структуры, в которой волокна представляются набором тонких волоконцев (фибрилл).

Отметим, что применение градиентных моделей моментной теории упругости типа Коссе-ра – Миндлина – Лурье для проектирования композитных конструкций в настоящий момент крайне ограничено, поскольку используемые технологии не позволяют получать, например, волокна со специально созданной биоподобной иерархической структурой.

2. Мини-миди-механика. Свойства компонентов, наиболее эффективные для торможения трещины поверхностью раздела

Основные преимущества пластиков, армированных волокнами типа стекло-, углепластиков заключаются не только в высокой прочности вдоль направления волокон, возникающей благодаря масштабному эффекту прочности, но и в нехрупкости, обязанной своим возникновением неоднородной структуре материала, наличию непрочных поверхностей раздела «волокно-матрица». Такая структурная неоднородность встречается практически во всех природных материалах, например, в древесине. Трещина поперек ствола (надпил) никогда не распространяется вдоль первоначального направления, а может вызвать лишь расщепление вдоль ствола, останавливающее развитие первоначальной трещины.

Результаты, приведенные ниже, относятся к комбинации мини-миди уровней. Прочностные свойства компонентов наделены смыслом микромеханических характеристик структуры, но распределение напряжений находится из решения задачи теории упругости однородного анизотропного тела, разрушение которого происходит по непрочным границам раздела «волокно-матрица».

В ранних работах Дж. Гордона [14] была численно решена ставшая впоследствии классической задача об остановке границей раздела волокно-матрица эллиптической трещины, около вершины которой (рис. 1, а) наблюдается сложное напряженное состояние. Кроме «основных» продольных напряжений $\sigma_{yy} = p$ в волокнах и достигающих максимума σ_{yy}^{\max} на кончике трещины с координатами $(a, 0)$, возникают напряжения поперек волокон σ_{xx} , а также касательные напряжения τ_{xy} , которые вызывают разрушение поверхности раздела волокно-матрица, которая параллельна направлению нагру-

жения (оси y). Вновь образованная микротрещина резко снижает концентрацию напряжений на кончике и оказывается ловушкой для первоначальной макротрещины.

Основные ошибки в задаче Гордона

В работах Гордона и Кука [14] было численно оценено отношение максимального значения (на оси x) напряжений $\sigma_{xx}^{\max-x}$, действующих поперек волокон, к наибольшему значению (на оси y) напряжений σ_{yy}^{\max} вдоль волокон, при $\varepsilon = b/a \rightarrow 0$ в изотропном случае это отношение равно примерно 1/5. Гордон утверждал, что, если прочность поперек приложенной нагрузки меньше 1/5 от прочности вдоль, то начальная макротрещина вызовет перед собой разрушение поверхности раздела, и продольная микротрещина расщепления остановит рост макротрещины. В случае, если поверхность раздела «волоконно-матрица» достаточно прочная ($\sigma_x^* \geq \sigma_y^*/5$), макротрещина беспрепятственно пересечет поверхность раздела, и материал будет вести себя хрупким образом. (В обозначениях прочностей σ_x^* , σ_y^* сохраняется один индекс x, y , так как параметры прочности не обязаны представлять собой тензор — в отличие от напряжений: $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$).

Это изящное, но, к сожалению, нестрогое рассуждение Гордона цитируется во многих монографиях и статьях по композитам. В трудах [15, 16] приводится строгое аналитическое решение «задачи Гордона» для ортотропной пластины с эллиптическим отверстием, с отношением радиусов $\varepsilon = b/a \rightarrow 0$. На основании этого решения можно отметить три принципиальные неточности в выводах Гордона:

1. Отношение продольных напряжений к поперечным в изотропном случае $\frac{\sigma_{xx}^{\max-x}}{\sigma_{yy}^{\max}} = \frac{1}{3\sqrt{3}} = \frac{1}{3\sqrt{3}} = 0,192 \approx \frac{1}{5}$ — не «мировая константа», оно зависит от степени анизотропии материала.

2. Компоненты напряжений $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ достигают своих максимумов на контуре отверстия, именно поэтому расщепление всегда начинается на контуре любого отверстия или трещины (рис. 1, b).

3. Для расщепления наибольшее значение имеют касательные напряжения, так как они существенно больше поперечных, особенно — в сильно анизотропных материалах типа древесины или пластика, все волокна в которых уложены только в одном направлении (рис. 2), условие появления расщепления до разрыва волокон можно сформулировать в простом виде:

$$\frac{\tau_{xy}^{\max}}{\sigma_{yy}^{\max}} \geq \frac{\tau^*}{\sigma_y^*}, \tag{1}$$

где τ^*, σ_y^* — прочностные свойства композита на сдвиг и разрыв вдоль волокон.

Отношение прочностей на сдвиг и растяжение вдоль волокон (справа в равенстве (1)) есть свойство материала, а отношение наибольших напряжений около отверстия $\tau_{xy}^{\max}/\sigma_{yy}^{\max}$, как показали расчеты, слабо зависит от формы отверстия, поэтому равенство в выражении (1) соответствует оптимальным упруго-прочностным свойствам материала, в котором реализуется механизм торможения трещин.

Принцип равнопрочности — один из фундаментальных в теории оптимального проектирования — применительно к волокнистым композитным материалам можно трактовать по-новому, и равнопрочность можно понимать, имея в виду равенство (1), как условие одновременности возникновения около отверстий или трещин различных видов разрушения: разрыв волокон и скол по матрице (расщепления поверхности раздела).

Остановка поперечных трещин за счет образования продольных, т.е. расщепление непрочных поверхностей раздела, — одно из главных преимуществ природных и полимерных композитов, делающее возможным одновременное повышение и прочности, и трещиностойкости. У традиционных конструкционных сплавов проявляется про-

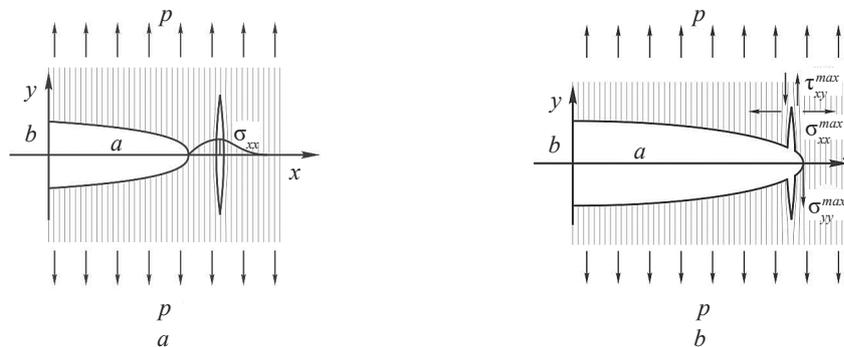


Рис. 1. Схемы остановки трещины поверхностью раздела: a — по Гордону — расщепление перед трещиной; b — уточненная схема — расщепление на контуре

Fig. 1. Schemes for stopping the crack by the interface: a — according to Gordon — splitting before the crack; b — updated diagram — splitting on the crack periphery

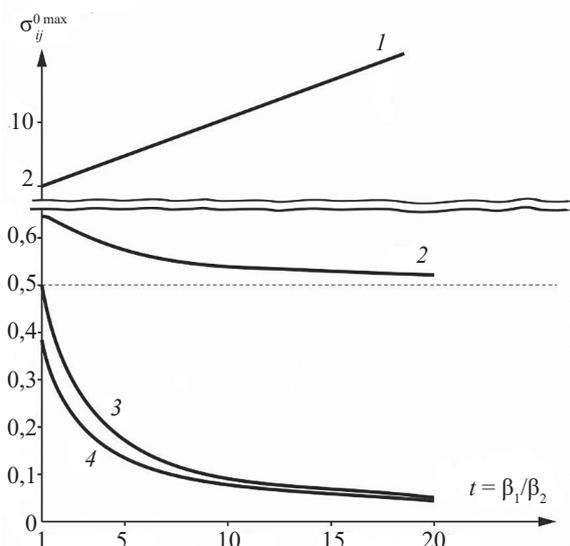


Рис. 2. Зависимости нормированных наибольших напряжений $\sigma_{ij}^{0 \max}$ около эллиптической «трещины» от степени анизотропии материала: 1 – $\sigma_{yy}^{0 \max}$; 2 – $\tau_{xy}^{0 \max} = (\varepsilon/p)\tau_{xy}^{0 \max}$; 3 – $\sigma_{xx}^{0 \max}$; 4 – $\sigma_{xx}^{0 \max-x}$; β_1, β_2 — параметры, зависящие от анизотропии свойств материала, для изотропного материала $\beta_1 = \beta_2 = 1$

Fig. 2. The dependencies of normalized greatest stresses $\sigma_{ij}^{0 \max}$ near the elliptical “crack” on the degree of the material anisotropy: 1 – $\sigma_{yy}^{0 \max}$; 2 – $\tau_{xy}^{0 \max} = (\varepsilon/p)\tau_{xy}^{0 \max}$; 3 – $\sigma_{xx}^{0 \max}$; 4 – $\sigma_{xx}^{0 \max-x}$; β_1, β_2 — parameters depending of the material anisotropy properties. For the isotropic material $\beta_1 = \beta_2 = 1$

типоволожная тенденция: повышение прочности (снижение пластических свойств) сопровождается снижением трещиностойкости, а значит, «надежности» материала, которую можно характеризовать допустимой длиной трещины. Низкая трещиностойкость очень опасна при низких, криогенных температурах, например, в резервуарах для жидкого гелия (обеспечивающего сверхпроводимость), где композиты оказываются чрезвычайно эффективными.

Интересно отметить, что равенство в формуле (1) с хорошей точностью выполняется для прочных сортов древесины: для дуба $\tau_{xy}^{\max}/\sigma_{yy}^{\max} = 0,095$; $\tau^*/\sigma_y^* = 0,091$; для сосны соответствующие отношения равны 0,14 и 0,093. Отношение прочностей несколько меньше, чем отношение напряжений, поэтому расщепление предшествует разрыву волокон, и развитие поперечной трещины (например, от удара топором поперек ствола) в древесине невозможно.

Для стеклопластика, армированного в одном направлении, согласно формуле (1), прочность на сдвиг должна быть около 150 МПа, а реальная прочность полимерной матрицы втрое ниже, именно поэтому однонаправленные композиты расщепляются около концентраторов напряжений задолго до достижения в волокнах предела прочности.

3. Методы построения биоподобных криволинейных, равнонапряженных траекторий волокон

Удельные прочностные характеристики пластиков, армированных волокнами, наиболее полно проявляются в тех изделиях, в которых нагрузки близки к одноосным, и получается создать однонаправленную структуру армирования. Наибольший эффект от применения стеклопластиковых композитов относится как раз к спортивным снарядам с подобным армированием: шест для прыжков в высоту, лук, лыжи и лыжные палки, клюшки и т.п. Но как только в элементе конструкции, и особенно в узлах сопряжения с другими деталями, возникает сложное напряженное состояние, не только однонаправленное, но даже просто — прямолинейное армирование перестает быть эффективным. Да и природа никогда не использует только прямолинейное армирование. Для эффективного сопротивления скручивающей ветровой нагрузке на стволе дерева появляются сучки (даже без веток), и свилеватая волокнистая структура вокруг сучка способствует предотвращению расщеплений. Мачтовые сосны, растущие в безветренных долинах, — скорее исключение, чем правило. А под воздействием ветра древесина стремится к очень прочной криволинейной структуре типа «карельской березы».

Наблюдения за природными волокнистыми структурами натолкнули ученых на мысли о необходимости применения для композитных конструкций оптимальной, криволинейной структуры армирования, такой, в которой траектории укладки волокон согласуются с полями действующих напряжений. Подобным исследованиям посвящено огромное число работ [17–27], и в частности, публикации [28–41], в которых рассматривается построение оптимальных траекторий волокон, «обтекающих» круговое отверстие.

Традиционно по критериям равнонапряженности или минимума массы проводят оптимизацию только формы деталей, в том числе современными методами топологической оптимизации. Применение криволинейного армирования позволяет осуществлять одновременную компьютерную оптимизацию формы детали и расположения-укладки волокон (Computer Aided Internal Optimisation — CAIO). Критерии оптимизации (функции цели) могут быть различными: не только наибольшая прочность [34] или минимум собственной массы конструкции, но и максимальная нагрузка при потере устойчивости [29] или максимальная частота собственных колебаний [25] (для армированных, слоистых пластин и оболочек). Расчеты напряжений производят с помощью методов конечных элементов (МКЭ), а оптимизацию структуры армирования конструкции методами нелинейного программирования [30, 34] или клеточных автоматов [23].

Моделирование траекторий волокон, «обтекающих» отверстия

Больше всего исследований уделено решению задач об оптимальной укладке волокон в зоне отверстий с помощью современных компьютерных методов [30–39]. За критерий оптимальности при построении полей углов ориентации волокон около отверстия часто принимается *минимаксный критерий*, т.е. условие обеспечения минимального значения максимального коэффициента концентрации напряжений. Пластина с отверстием, которая подвергается растяжению, автоматически разбивается на сетку конечных элементов (КЭ) (их могут быть тысячи), и каждому элементу присваивается свой (заранее неизвестный) угол ориентации χ_i волокон. Пространство переменных \bar{x} имеет размерность, равную числу КЭ. За функцию цели принимается максимальное напряжение около отверстия $f(\bar{x}) = \sigma_{\max}(\bar{x})$, и требуется, чтобы оно было минимальным для найденного, оптимального набора параметров проектирования:

$$Opt\{f(\bar{x})\} = \min\{\max[\sigma(\bar{x})]\} = \sigma_{\max}(\bar{x}_{opt}). \quad (2)$$

Процедуры нахождения оптимального распределения углов разориентации волокон в КЭ оставляют открытым вопрос о возможности построения системы непрерывных траекторий волокон.

В трудах [39–41] показан иной метод построения траекторий волокон, которые должны совпадать с траекториями главных растягивающих напряжений. Прямое, последовательное построение непрерывных траекторий волокон, слой за слоем, дает возможность непосредственно переходить к аддитивным технологиям, обеспечивающим рациональную структуру криволинейного армирования в зоне отверстий, выточек или узлов крепления. Траектории уложенных вокруг отверстия волокон напоминают древесную структуру в зоне сучка (рис. 3, а).

Траектории главных напряжений с помощью предложенного в исследованиях [39, 40] универсального алгоритма, ниже приведен классический пример классической задачи о растяжении широкой пластины с отверстием (рис. 3, б). Принцип постро-

ения кусочно-линейных траекторий наибольших главных напряжений в полярной системе координат $r - \theta$ (рис. 3, б) показан на рис. 4. Траектории строятся от левого края пластины, где их можно считать параллельными приложенному напряжению ($\beta = 0$). Зная распределение напряжений в пластине с отверстием, можно для каждой точки с координатами r_i, θ_i найти угол β_i , вдоль которого отсутствуют касательные напряжения. Далее из точки r_i, θ_i для принятого из соображений точности приращения Δ и рассчитанного угла β_i находят точку с координатами r_{i+1}, θ_{i+1} , и в этой точке определяют новый угол β_{i+1} в диапазоне $\beta_i \pm \gamma$. Условно критический угол ограничен $\gamma = 30^\circ$, чтобы не было резкой смены направления траекторий и перескока на другое главное напряжение.

С помощью МКЭ находят значения и направления главных напряжений в узлах КЭ. На рис. 5 приведен прямоугольный элемент ABCD с номером i и номерами узлов $k = 1, \dots, 4$. Расчеты позволяют для каждого узла определить угол β_{ik} , вдоль которого касательные напряжения равны нулю. Необходимо для произвольной точки E внутри элемента ABCD найти угол β_i , вдоль которого касательные напряжения равны нулю. Связь угла β_i с углами β_{ik} в узлах элемента и с расстояниями r_{ik} от точки E до узлов можно выразить некоторой функцией (3), где для простоты принято $n = -1$:

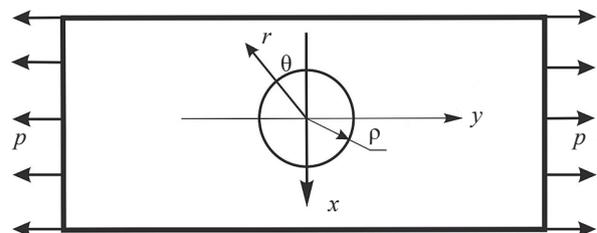
$$\beta_i = \frac{\sum_{k=1}^4 (r_{ik}^n \beta_{ik})}{\sum_{k=1}^4 r_{ik}^n}. \quad (3)$$

Нахождение углов β_i для любого i -го КЭ позволяет по схеме, приведенной на рис. 4, построить показанные на рис. 6 траектории, вдоль которых касательные напряжения равны нулю.

Траектории волокон в деревянных образцах, как видно на рис. 3, а, подобны линиям, полученным расчетным путем (рис. 6), и это подтверждает гипотезу о том, что древесина в процессе роста адаптивным способом строит равнонапряженную



а



б

Рис. 3. Структура древесины сосны в зоне сучка (а); растяжение пластины с отверстием (б)

Fig. 3. Structure of pine wood in knot area (a); straining of plate with hole (b)

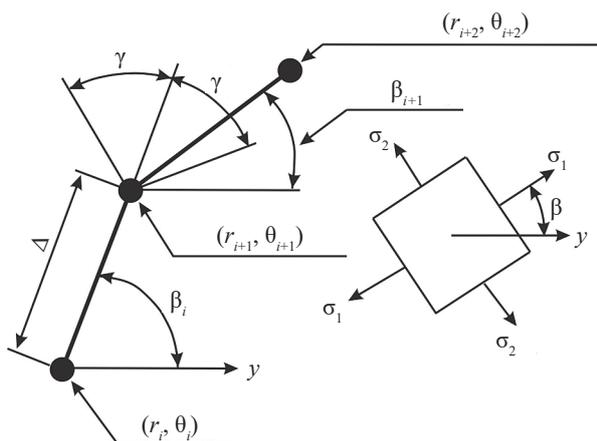


Рис. 4. Схема построения траекторий наибольших главных напряжений в полярной системе координат $r-\theta$; β_i — углы ориентации траектории

Fig. 4. The scheme for constructing of the greatest main stresses trajectories in the polar coordinate system $r-\theta$; β_i — trajectory orientation angles

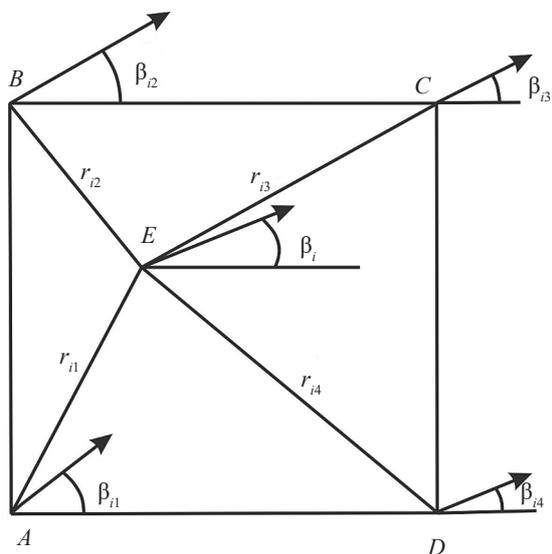


Рис. 5. Определение угла β_i ориентации волокна в точке E элемента $ABCD$ с номером i в зависимости от углов ориентации β_k в узлах элемента с номером k

Fig. 5. Determination of fiber orientation angle β_i at point E of element $ABCD$ with number i depending on orientation angles β_k at nodes of element with number k

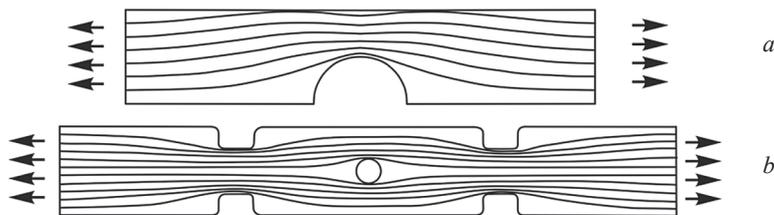


Рис. 6. Равнонапряженная структура укладки волокон вдоль траекторий наибольших главных напряжений: вблизи отверстий (a) и выточек (b) в растягиваемой пластине

Fig. 6. The equally stressed structure of fibre laying along the trajectories of the greatest major stresses near the holes (a) and recesses (b) in the straining plate

структуру, исключая опасные касательные напряжения, которые могут вызвать расщепление.

4. Биомеханические принципы проектирования узлов крепления композитных деталей

Одной из наиболее значимых фундаментальных задач композитного конструирования является разработка способов крепления, максимально реализующих прочностные характеристики волокон.

Значительное количество работ [43–52] связано с широко применяющимися заклепочными и болтовыми соединениями. Большое число исследований [53, 54] посвящено T -образным соединениям — поперечной (*transversal*) прошивке (T -joints). На взгляд авторов, более перспективны методы крепления, основанные на опыте живой природы, — биоподобные соединения [55–60].

Методы соединения композитов, которые используются в повседневной технологической практике наиболее широко, отражают накопленный опыт работы с металлами, однако для пластиков, армированных волокнами, они оказываются недостаточными, а порой и неэффективными. Для понимания сложности проблемы соединений достаточно представить деревянную конструкцию. Десятки тысяч лет человечество работает с древесиной — прекрасным, экологически чистым, возобновляемым материалом, превосходящим сталь по удельной прочности (вдоль волокон). И каков результат? Какие способы соединений были изобретены для древесины?! Гвозди, шурупы, клеи, шипы-пазы и посадка (топора на топорище). Все плохо, кроме последнего. Такие же проблемы, как и в деревянных изделиях, возникают в композитных деталях с прямолинейной укладкой волокон. Один из путей создания прочных мест соединений, подсказанный природой, состоит в формировании отверстий и узлов крепления в процессе изготовления деталей из полимерных композитов.

Анализ традиционных методов крепления

Можно выделить три основных типа применяемых методов крепления композитных элементов: 1) через отверстия: заклепочные, болтовые; 2) по поверхности: клеевые; 3) через закладные детали.

Каждый тип крепления имеет как преимущества, так и принципиальные недостатки.

- Сверление отверстий под заклепки и болты позволяет использовать наработанный для металлических деталей опыт, но есть принципиальные особенности:

- при сверлении разрушаются волокна, поэтому ослабляются силовые связи в месте отверстия;
- появляется концентрация напряжений около отверстий, для металлов, впрочем, тоже;
- возникает расщепление и расслоение волокон около просверленных отверстий.

- Для склеивания композитов применяют высокопрочные, быстро затвердевающие клеи с прекрасной адгезией, но применительно к пластикам с армированными волокнами:

- сложно в полной мере реализовать прочность волокон, поскольку усилия, приложенные по поверхности детали, передаются на волокна через непрочную полимерную матрицу;
- клеи проявляют вязкоупругость, их свойства сильно зависят от температурного режима, а склеенные поверхности адсорбируют влагу;
- около края клеевого соединения возникает значительная концентрация напряжений.

- Перспективно применение закладных металлических деталей перед обмоткой волокнами в процессе изготовления изделия до его полимеризации, но, если они вводятся путем механической обработки готового изделия, то остаются те же недостатки, что и при сверлении:

- разрушаются волокна, возникает значительная концентрация напряжений в зоне контакта разнородных материалов;
- неприменима сварка, так как полимерные композиты не выдерживают высоких температур;
- локально меняется структура армирования, что снижает прочность соединения по сравнению с рабочей частью детали.

Места соединения были и остаются наиболее слабым звеном, в котором теряется основная часть преимуществ волокнистых полимерных материалов. Природные соединения (ветви, корни, скелет и др.) пока еще не нашли достойного отражения в композитном проектировании.

Заклепочные и болтовые соединения композитов

Очевидные недостатки (лучшего нет) не мешают применению заклепочных и клееболтовых соединений в конструкциях из армированных пластинок, поскольку металлические технологические традиции все еще весьма сильны. Но очевидно, что отверстия нужно формировать до пропитки и полимеризации смолы при выкладке тканью, накладывая слой препрега на заостренные штыри. При этом волокна раздвигаются без разрушения, и несущая спо-

собность заклепочного соединения с применением таких отверстий повышается примерно на 40 %.

Очевидные недостатки соединений через отверстия частично компенсируются некоторыми преимуществами [16]: 1) устойчивым характером смятия материала под заклепкой; 2) подкрепляющим действием усилий поперек заклепки, исключая локальную потерю устойчивости слоев при сжатии; 3) высокой эффективностью применения тонких заклепок («гвоздей», прошивка проволокой). При равной площади смятия материала, которая пропорциональна сумме диаметров, десять заклепок с десятикратно меньшим диаметром должны «прорезать» пластину при смятии по в 10 раз большему числу линий, чем одна заклепка большого диаметра, что и обеспечивает рост суммарной несущей способности.

Уменьшение диаметра заклепок или болтов, а также рациональное их расположение способствуют повышению эффективности таких соединений для панелей из волокнистых композитов. Однако технология пересиливает поисковые исследования: для «удобства установки» заклепки имеют фиксированный диаметр (4–6 мм), и их располагают с одинаковым числом в каждом ряду, что, конечно, очень нерационально по несущей способности.

Биомеханические принципы создания равнонапряженных структур армирования

Принципиальные недостатки применяемых способов соединения композитных деталей заставляют обратиться за опытом к живой природе, и «конструкция» сучка может подсказать направление движения в правильную сторону: как нужно расположить волокна для снижения напряжений в зоне соединения. Отверстия в композитных пластинах нужны не сами по себе, а как часть болтового или заклепочного соединения. Поэтому описанные в разделе 3 траектории волокон, «обтекающих» свободное отверстие, нужны скорее, как иллюстрация эффективности алгоритма [40] построения непрерывных траекторий волокон. Более интересна с практической точки зрения задача о траекториях армирования в зоне отверстия, нагруженного через закладную деталь, шпильку, болт, заклепку (рис. 7).

Рациональные траектории волокон при нагружении композитной пластины через отверстие

По аналогии с подходом [39, 40], изложенным в разделе 3, была смоделирована композитная пластина с отверстием, в которое вставлено металлическое кольцо, передающее нагрузку. Если кольцо считать абсолютно жестким (по сравнению с контактной жесткостью композита), то граничные условия формулируются в виде задания смещения на контуре отверстия. Наиболее сложна постановка контактной задачи с неизвестной границей контакта.

Во время расчета при задании граничных условий принимают некоторые упрощающие гипотезы. Во-первых, контакт между нагружающей половиной кольца и контуром отверстия считают идеальным в смысле совпадения радиальных перемещений. Иногда принимают условное ограничение на угловой размер зоны контакта. Во-вторых, принимают допущение о коэффициенте трения по границе контакта. Либо трение отсутствует (свободное проскальзывание), либо коэффициент трения бесконечен (идеальное «прилипание»), либо учитывают некоторые зоны проскальзывания. Учет трения делает контактную задачу и ее компьютерное моделирование чрезвычайно сложным. И, в-третьих, принимают некоторое распределение напряжений по контуру отверстия (рис. 7) для того, чтобы интеграл от напряжений по границе контакта совпадал с приложенной силой. Последнее допущение наиболее просто выполнить, представив распределение напряжений гармонической функцией ($k\cos\theta$) от угловой координаты θ . При таком упрощении задача сводится ко второй краевой задаче теории упругости при постоянных граничных условиях, заданных в напряжениях.

На рис. 8 приведен эскиз пластины с рациональными траекториями волокон вокруг отверстия.

Следует отметить, что проведение ряда итераций построения траекторий имеет принципиальное значение. Траектории, построенные на первом шаге, когда за исходный принимается однородный ортотропный материал, существенно отличаются от траекторий при последующих итерациях. Еще один принципиальный момент связан с тем, что при приложении нагрузки через отверстие (см. рис. 8) на некоторых участках волокон возникают растягивающие напряжения, а в других — сжимающие. Нахождение границ этих участков при сохранении непрерывности траекторий требует определенного искусства отработки вычислительного алгоритма.

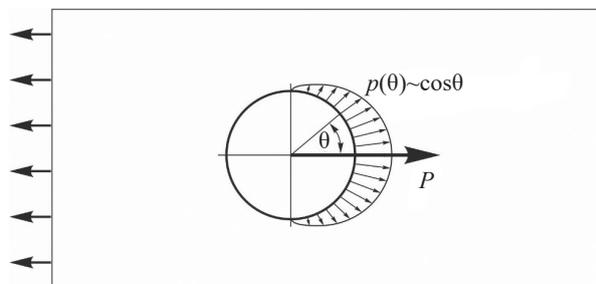


Рис. 7. Схема нагружения композитной пластины через шпильку или кольцо

Fig. 7. Scheme of composite plate loading through pin or ring

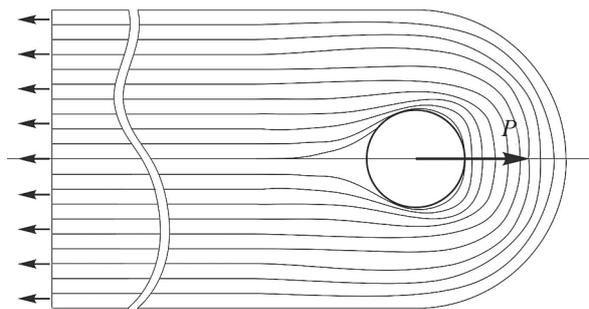


Рис. 8. Рациональные траектории волокон, огибающих нагруженное через шпильку отверстие, построенные по алгоритму [39, 40]

Fig. 8. Rational trajectories of fibers enveloping the hole loaded through the pin, built according to the algorithm [39, 40]

5. Структура и механизмы разрушения бамбука и композитных труб. Миди-механика

Одно из наиболее удивительных и совершенных произведений природы, как инженера, — быстрорастущий стебель бамбука — привлекает не только инженеров из Гонконга, как прекрасный, незаменимый материал, применяемый в строительных лесах для высотных зданий, но и большое число исследователей, пытающихся познать загадки структуры бамбука и перенести природный опыт на проектирование композитных структур.

Сложное строение бамбука, включающее слои волокон в различных направлениях, пустоты, вязкоупругий связующий материал, исследовали в большом числе работ [61–63]: изучали влияние расстояния между коленами-диафрагмами на прочность при сжатии, изгибе, кручении [64]. В публикации [65] проведен анализ различных природных методов упрочнения тонких биологических труб: ствола бамбука (диафрагмы-«суставы» на определенных расстояниях), костей птиц (поперечные линейные перемычки), стеблей тростника (наполнение пеной). Подробно рассмотрены также механизмы потери несущей способности тонкостенной трубы при изгибе в виде овализации первоначально кругового сечения [65]. На русском языке содержание статьи [65] изложено в разделе 2.5 книги [16].

В работе [66] для сжатия бамбуковой трубы предложен энергетический критерий расщепления с выпучиванием по форме китайского фонарика, что получило развитие в труде [67] для кручения тонкостенных однонаправленных композитных труб. Применяя энергетический критерий разрушения, удастся рассчитать хорошо совпадающие с реальными, оптимальные размеры звена бамбука. Публикации [16, 46, 66, 67] посвящены анализу в рамках миди-уровня, когда материал представляется однородным, ортотропным, но содержащим слабые поверхности раздела (weak interface), которые и определяют механизмы разрушения расслоением (между слоями) или расщеплением (вдоль волокон).

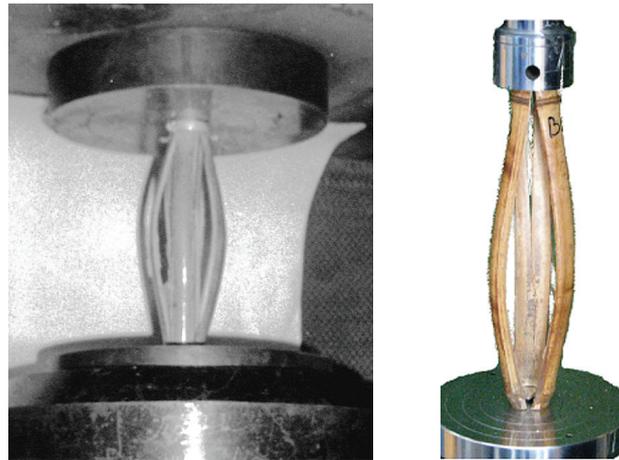


Рис. 9. Превращение звена бамбука в китайский фонарик при сжатии

Fig. 9. Turning the bamboo pipe into a Chinese lantern after compression

Разрушение при сжатии однонаправленных композитных труб или звена бамбука по форме китайского фонарика

При сжатии композитных труб, волокна в которых уложены вдоль действующего напряжения, наряду с макрпотерей устойчивости по Эйлеру или локальным смятием по торцам возможно также множественное продольное расщепление с выпучиванием образовавшихся полосок (рис. 9) по форме, напоминающей китайский фонарик (Chinese Lantern) [46, 66]. Применение энергетического критерия для анализа такого разрушения позволяет оптимизировать размеры композитных труб, здесь работает принцип равнопрочности, реализуемый природой при создании стебля бамбука.

В исследовании [16] рассмотрено сжатие трубы длиной L со средним радиусом $R_c = (R_1 + R_2)/2$ и толщиной стенки $h = R_1 - R_2$, где R_1, R_2 — наружный и внутренний радиусы трубы. Под напряжением σ в трубе накапливается упругая энергия: $U_0 = \sigma^2 FL / (2E_x) = nU_{0\alpha} = n\sigma^2 F_\alpha L / (2E_x)$, которая складывается из упругих энергий в каждой полоске, на которые расщепляется труба, где E_x — модуль упругости при сжатии; $F = \pi(R_1^2 - R_2^2) \approx 2\pi R_c h = nF_\alpha$ — площадь сечения трубы, равная сумме площадей сечений полосок.

При расщеплении на n одинаковых полосок с сечением в виде сектора кольца с угловым размером $2\alpha = 2\pi/n$ (рис. 10, b) работа расщепления равна $W = n\gamma^* Lh$, где γ^* — удельная энергия расщепления вдоль волокон.

На одну полоску приходится следующая работа расщепления: $W_\alpha = \gamma^* Lh$. Эйлерино напряжение для каждой полоски вычисляется по формуле

$$\sigma_e(\alpha) = \frac{12\eta E_x I_\alpha}{F_\alpha L^2}, \quad (4)$$

где $\eta = \pi^2/12$ при свободном опирании концов полоски; $F_\alpha = \alpha(R_1^2 - R_2^2) \approx 2\alpha R_c h$ — площадь сектора кольца, момент инерции которого:

$$I_\alpha = (\alpha + \sin\alpha \cos\alpha) \frac{R_1^4 - R_2^4}{4} - \frac{4 \sin^2 \alpha (R_1^3 - R_2^3)^2}{9\alpha (R_1^2 - R_2^2)}. \quad (5)$$

Энергия сжатия полоски после выпучивания выражается через эйлерино напряжение (4): $U_{ca} = \sigma_e^2(\alpha) F_\alpha L / (2E_x)$, а энергия изгиба полоски: $U_{ba} = \sigma_e^2(\sigma - \sigma_e) F_\alpha L / E_x$. Согласно энергетическому критерию разрушения для одной полоски:

$$U_{0\alpha} = U_{ca} + U_{ba} + W_\alpha \quad (6)$$

откуда получается квадратное уравнение для напряжения $\sigma^2 = \sigma_e^2 + 2\sigma_e(\sigma - \sigma_e) + 2E_x \gamma^* h / F_\alpha$, а критическое напряжение:

$$\sigma^* = \sigma_e(\alpha) + \sqrt{\frac{E_x \gamma^*}{\alpha R_c}}. \quad (7)$$

С ростом количества полосок n (с уменьшением угла α) увеличивается суммарная работа рас-

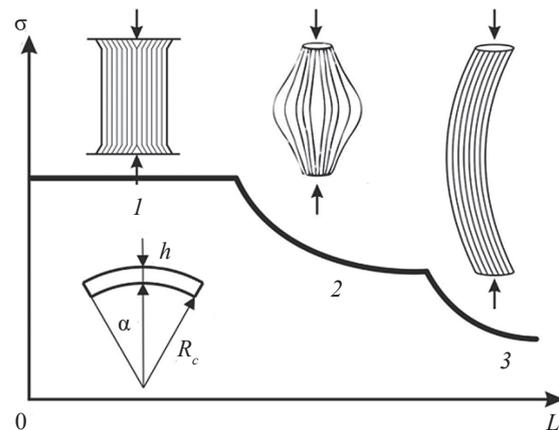


Рис. 10. Зависимости критических напряжений от длины L при сжатии композитных труб для трех видов разрушения: 1 — локальное смятие; 2 — китайский фонарик; 3 — макрвыпучивание

Fig. 10. Dependencies of critical stresses on length L during compression of composite pipes for three types of failure: 1 — local crushing; 2 — chinese lantern; 3 — eulerian instability

щепления, но снижается эйлерово напряжение (4), так как форма криволинейного сечения полоски приближается к прямоугольной. Две эти противоречивые тенденции приводят к наличию некоторого энергетически выгодного угла α^* , соответствующего наименьшему критическому напряжению (7): $\sigma_l = \min \sigma(\alpha) = \sigma(\alpha^*)$, для нахождения которого необходимо численно решить трансцендентное уравнение $\partial \sigma^* / \partial \alpha = 0$. Чтобы получить результат в замкнутом виде, необходимо постулировать отношение порядков малости α и h/R_c . Для получения наглядного результата можно принять $h/R_c \ll \alpha^2$, тогда:

$$\alpha^* = \left(\frac{2025 \gamma^* L^4}{64 \pi^4 E_x R_c^5} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (8)$$

и минимальное разрушающее напряжение $\sigma_l(l - lantern)$:

$$\sigma_l = \frac{9}{8} \left(\frac{8 \pi^2 \gamma^* E_x^5}{45 R_c^2 L^2} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (9)$$

Разные механизмы разрушения.

Равнопрочные размеры звена бамбука

Разрушение звена бамбука или композитной трубы с однонаправленной укладкой возможно по трем основным механизмам (рис. 10): 1) смятие по торцам при критическом напряжении $\sigma = \sigma_c$, не зависящее от длины трубы; 2) множественное продольное расщепление с выпучиванием по форме китайского фонарика при напряжении σ_l (9); 3) макровыпучивание по Эйлеру при напряжении (4).

Если задаться условием одновременности наступления трех основных видов разрушения, то возможно найти не только рациональное отношение размеров: радиуса R_c трубы к расстоянию L между стягивающими кольцами (диафрагмами), но и абсолютные (мм) оптимальные размеры за счет проявления масштабного эффекта прочности, описываемого энергетическим критерием:

$$R_{c0} = 1,01 \frac{E_x \gamma^*}{\sigma_c^2}; L_0 = 2,24 \frac{E_x^{3/2} \gamma^*}{\sigma_c^{5/2}} \quad (10)$$

Условие равнопрочности (10) обеспечивает минимальную массу трубы для заданной нагрузки. Подобным принципом руководствуется природа, создавая прочные многометровые стволы бамбука. Кольца располагаются так, чтобы не позволить стволу расщепиться от сжимающих напряжений при изгибе и касательных напряжений при кручении ствола под действием ветровой нагрузки. Поэтому нижние звенья-суставы бамбукового ствола короче, чем средние, где изгибные и сжимающие напряжения меньше.

Расщепление композитных труб и бамбука при кручении

В работах [16, 46, 67] с применением энергетического критерия рассмотрено продольное расщепление однонаправленных труб под действием крутящего момента (рис. 11) с учетом сдерживания

депланации сечения закреплениями по концам трубы. В бамбуковом стволе функцию заневоливания сечения выполняют сравнительно жесткие диафрагмы-колена, и они располагаются на таких расстояниях, чтобы не допустить расщепления. По сути, диафрагмы-колена переводят опасные для бамбука касательные напряжения в менее опасные продольные напряжения растяжения-сжатия (рис. 12), значения которых могут быть весьма велики. Условия равнопрочности при разрушении по двум механизмам — расщепления и смятия от сжатия определяют максимально возможную длину звена стебля бамбука между диафрагмами или композитной трубы между скрепляющими кольцами.

Из энергетического критерия следует, что повышение жесткости на кручение после стесненного

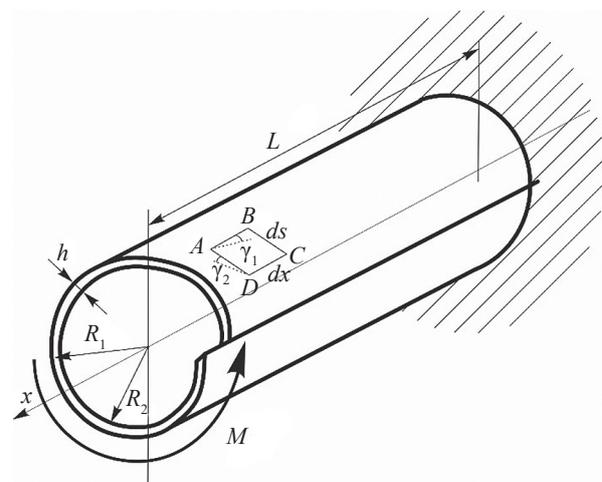


Рис. 11. Схема расщепления при кручении тонкостенной трубы с депланацией сечения и иллюстрация вычисления полной сдвиговой деформации $\gamma_1 = \gamma_2 = R_c \theta + \partial u / \partial s$

Fig. 11. Torsion split diagram of a thin wall pipe with section displanation and illustration of the calculation of total shear strain $\gamma_1 = \gamma_2 = R_c \theta + \partial u / \partial s$

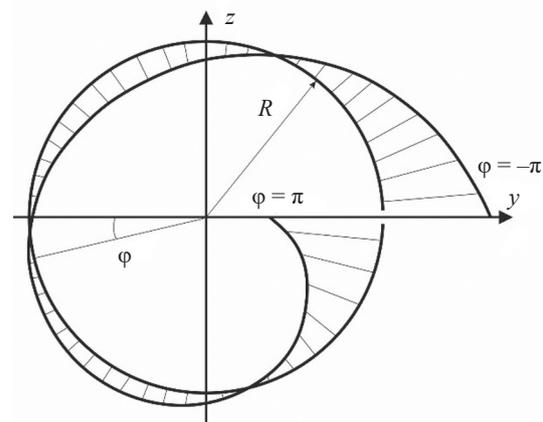


Рис. 12. Распределения нормальных напряжений в закрепленной по торцу, расщепленной при кручении трубе, возникших из-за стеснения депланации сечения

Fig. 12. Distribution of normal stresses in the pipe fixed at the end, split during torsion, arising due to section deplanation constriction

расщепления приводит к росту критического крутящего момента и к появлению значительных осевых напряжений:

$$M_0^+ = \sqrt{\frac{4\pi\gamma^* G_{xy} R_c^3}{h^2 - [3R_c^2(1 - 2pB_2/\lambda)]^{-1}}};$$

$$\sigma_{\max} = 0,76 \frac{MB_2}{R_c h^2} \sqrt{\frac{E_x}{G_{xy}}}. \quad (11)$$

В выражении (11): p — коэффициент заделки ($p = 0$ — нестесненное кручение, $p = 1$ — абсолютно жесткая заделка); $B_2 = [\text{ch}\lambda - 1]/\text{sh}\lambda$, E_x , G_{xy} — продольный модуль упругости и модуль сдвига; $\lambda = L/k$; $k = (R^2/h)\sqrt{(\pi^2 - 6)E_x/G_{xy}}$.

6. Проектирование биоподобных ветвящихся и профилированных композитных изделий

Строение кроны дерева в течение многих столетий привлекало интерес исследователей. Леонардо да Винчи в своих заметках дал следующее утверждение: «Сумма квадратов диаметров ветвей одинакова до и после ветвления», и поэтому суммарная площадь поперечного сечения веток дерева должна быть постоянной в любом сечении кроны. Авторы многих работ [68–70] исследовали законы ветвления кроны деревьев и показывали, что изменение числа и диаметров ветвей можно описать показателями фрактальных размерностей Хаусдорфа. Но, кроме чисто академического интереса к законам ветвления, «правило Леонардо» подсказывает способ создания разветвленных композитных упругих элементов [71–74].

Рост изгибной податливости за счет ветвления

В листовых упругих элементах — рессорах повышение податливости возможно с помощью увеличения числа листов в рессоре при сохранении несущей способности, что позволяет накопить большую упругую энергию при заданной внешней силе. Но податливость при изгибе можно повысить и с помощью ветвления, как это «делает» природа для сохранения кроны дерева при сильнейшем урагане. Применительно к волокнистым композитам «правило Леонардо» о постоянстве суммарной площади поперечного сечения «ветвей» означает неизменное количество непрерывных волокон, что чрезвычайно важно для обеспечения высокой прочности композитного изделия.

В качестве модели ветвления на рис. 13 представлена консольная балка длиной l , диаметром основания d , нагруженная переменным изгибающим моментом, изменяющимся вдоль продольной координаты x по степенному закону:

$$M(\bar{x}) = M(1)\bar{x}^\gamma; \quad \bar{x} = x/l. \quad (12)$$

Нагружение концевой силой P соответствует $\gamma = 1$, равномерно распределенная нагрузка — $\gamma = 2$, линейно меняющаяся нагрузка — $\gamma = 3$.

На некотором расстоянии l_{N1} от свободного конца цилиндр «разветвился» на N одинаковых цилиндров меньшего диаметра с сохранением, согласно «правилу Леонардо», суммарной площади сечений:

$$\bar{d}_{Ni} = d_{Ni} / d = 1 / \sqrt{N}, \quad (13)$$

где d_{Ni} — диаметр меньших ветвей; второй нижний индекс означает номер узла ветвления, в данном случае — $i = 1$. Расстояние $\bar{l}_{N1} = l_{N1} / l$ выбирается из условия равнопрочности — равенства макси-

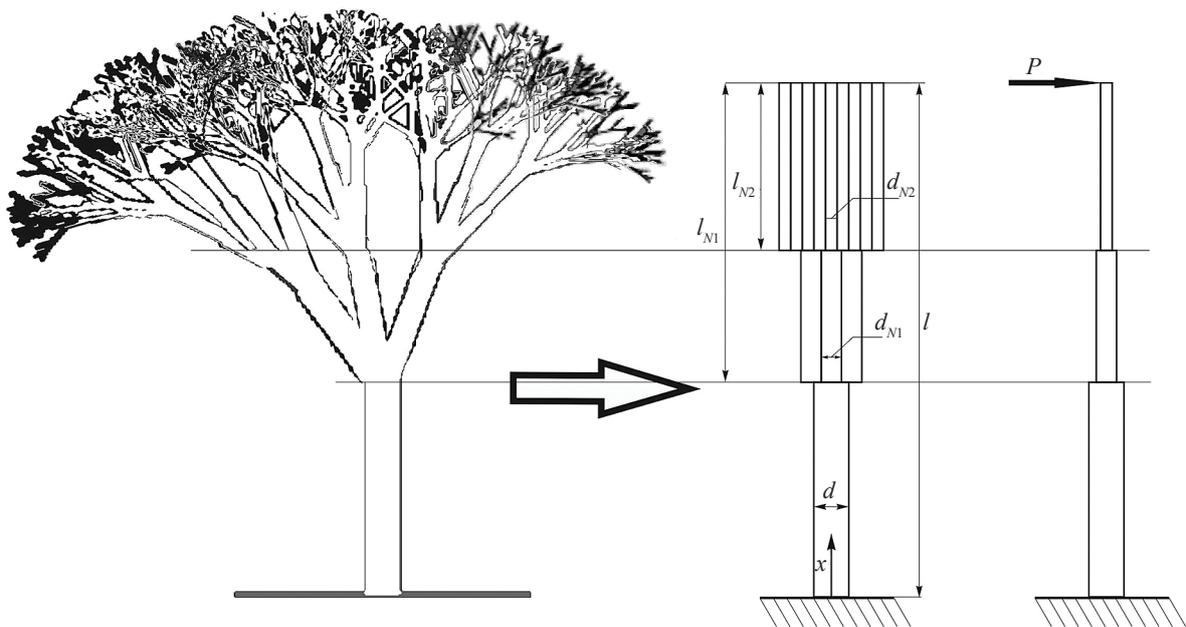


Рис. 13. Схема равнопрочного ветвления стержня с круговым сечением

Fig. 13. Scheme of equal-strength branch of rod with circular section

мальных напряжений в корневом сечении и в каждой из N ветвей в месте разветвления:

$$\frac{M(1)}{\pi d^3} = \frac{M(\bar{I}_{N1})}{N \pi d_{N1}^3} \Rightarrow N d_{N1}^3 = \bar{I}_{N1}^3 \Rightarrow \bar{I}_{N1} = N^{-1/2\gamma}. \quad (14)$$

Легко рассчитать изменение накопленной упругой энергии после ветвления:

$$U_{N1} = \frac{M^2(1)l}{2E} \left\{ \frac{1}{I_{N1}} \int_0^{\bar{I}_{N1}} \bar{x}^{2\gamma} d\bar{x} + \frac{1}{I} \int_{\bar{I}_{N1}}^1 \bar{x}^{2\gamma} d\bar{x} \right\} = U_0 \delta_U;$$

$$U_0 = \frac{M^2(1)l}{2EI(1+2\gamma)};$$

$$\delta_U = \left[1 + (N-1) \bar{I}_{N1}^{1+2\gamma} \right]; \quad (15)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64};$$

$$I_{N1} = N \frac{\pi d_{N1}^4}{64} = \frac{I}{N}.$$

Из условия максимума δ_U (15) можно найти число ветвей, на которое наиболее «выгодно» разветвиться для максимального повышения накопленной энергии:

$$\frac{d\delta_U}{dN} = 0 \Rightarrow N_{opt} = 1 + 2\gamma. \quad (16)$$

Для случая нагружения концевой силой $\gamma = 1$, $N_{opt} = 3$ для распределенной, «ветровой» нагрузки $\gamma = 2$, $N_{opt} = 5$. Для этих наиболее естественных случаев максимум накопленной энергии при сохранении равнонапряженности реализуется при ветвлении на целое число «веток»: ровно на три или на пять, соответственно.

При $N = 3$; $U_{31}/U_0 = 1 + 2/3^{3/2} \approx 1,38$. Это — наибольший коэффициент увеличения накопленной упругой энергии для одного ветвления с сохранением равнопрочности при нагружении концевой силой. При $N = 5$; $\Rightarrow U_{51}/U_0 = 1 + 4/5^{5/4} \approx 1,53$. Эффективность равнопрочного ветвления растет с ростом скорости изменения изгибающего момента.

Для продолжающегося процесса ветвления на оптимальное число N_{opt} , N_{opt}^2 , N_{opt}^3 , ..., N_{opt}^n ветвей в точках, соответствующих равнопрочности, накопленная энергия определяется сходящимся рядом:

$$U_{Nn} = U_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{N-1}{N^{1+i/2\gamma}} \right\} \right]. \quad (17)$$

Для $\gamma = 1$, $N = 3$:

$$\delta_U = \frac{U_{3n}}{U_0} = 1 + \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n 3^{-i/2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 + \frac{2}{3(\sqrt{3}-1)} \approx 1,91.$$

Это — наибольший коэффициент увеличения накопленной энергии, который можно получить при многократном ветвлении на три одинаковые ветки, что аналогично ступенчатому, а не плавному изменению профиля балки постоянной площади сечения — констэра (рис. 14). Чтобы повысить накапливаемую при изгибе энергию (податливость), надо плавно, «равнопрочно» изменять размеры сечения «веток» с сохранением площади сечения.

Для равномерной нагрузки $\gamma = 2$, $N = 5$ из выражения (17):

$$\delta_U = \frac{U_{5n}}{U_0} = 1 + \frac{4}{5} \sum_{i=1}^n 5^{-i/4} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 + \frac{4}{5(\sqrt[4]{5}-1)} \approx 2,5.$$

Формально можно оценить предельное значение коэффициента δ_U для непрерывного (фрактального, дробного) ветвления, представив постоянно меняющимся нецелое число $N(\bar{x}) = (d/d(\bar{x}))^2$ ветвей с сохранением суммарной площади (13), что эквивалентно плавному «равнопрочному» изменению момента инерции: $I(\bar{x}) = N(\bar{x}) I \times (d(\bar{x})/d)^4 = I/N(\bar{x})$. Из условия равнонапряженности (14): $N(\bar{x}) = \bar{x}^{-2} \Rightarrow I(\bar{x}) = I N^{-1}(\bar{x}) = I \bar{x}^{2\gamma}$. Из формулы (15) находится накопленная упругая энергия во фрактально разветвленном, равнопрочном, сохраняющем прежний суммарный объем стержне под действием переменного момента:

$$U_{N(\bar{x})} = \frac{M^2(1)l}{2E} \int_0^1 \frac{\bar{x}^{2\gamma}}{I(\bar{x})} d\bar{x} = \frac{M^2(1)l}{2EI} = (1+2\gamma)U_0. \quad (18)$$

Согласно оценке (18), «идеально»-непрерывно ветвящийся стержень может при сохранении массы в случае изгиба сосредоточенной силой накапливать втрое большую упругую энергию, чем однородный, а при распределенной нагрузке — в 5 раз больше.

Применение ветвящихся композитных балок возможно в качестве эффективных упругих элементов, например, для конструкций космического базирования (где нет ограничений по габаритам), и они при сохранении массы могут запасать в несколько раз большую упругую энергию, а если сравнивать весовую эффективность таких элементов, например, со стальными рессорами или пружинами, то низко-модульный и высокопрочный стеклопластик может дать выигрыш примерно в 15 раз.

Применение волокнистых композитов в упругих элементах типа рессор и ленточных пружин из равнопрочных профилированных листов

Аналогия между ветвлением и профилированной балкой постоянной площади поперечного сечения (констэра) показана в работах [75–79], где рассмотрены равнопрочные, профилированные композитные рессоры (рис. 14), моделируемые консольной балкой, размеры сечения которой (ширина w и толщина t) приняты изменяющимися по степенным законам:

$$w(\bar{x}) = w(1) \bar{x}^\alpha; \quad t(x) = t(1) \bar{x}^\beta; \quad \bar{x} = x/l. \quad (19)$$

Особенность расчета на прочность при заданной жесткости состоит в том, что при действии на рессору концевой силы необходимо одновременно удовлетворить двум противоречивым условиям:

- по жесткости (точно):

$$C = \frac{P}{v} = \frac{Ew(1)t^3(1)}{4\delta_v l^3}, \quad \delta_v = \frac{v(l)}{v_0} = \frac{1}{1 - \alpha/3 - \beta}, \quad (20)$$

и по прочности (с запасом):

$$\frac{6 P_{max} l}{w(1)t^2(1)} \leq \sigma^*. \quad (21)$$

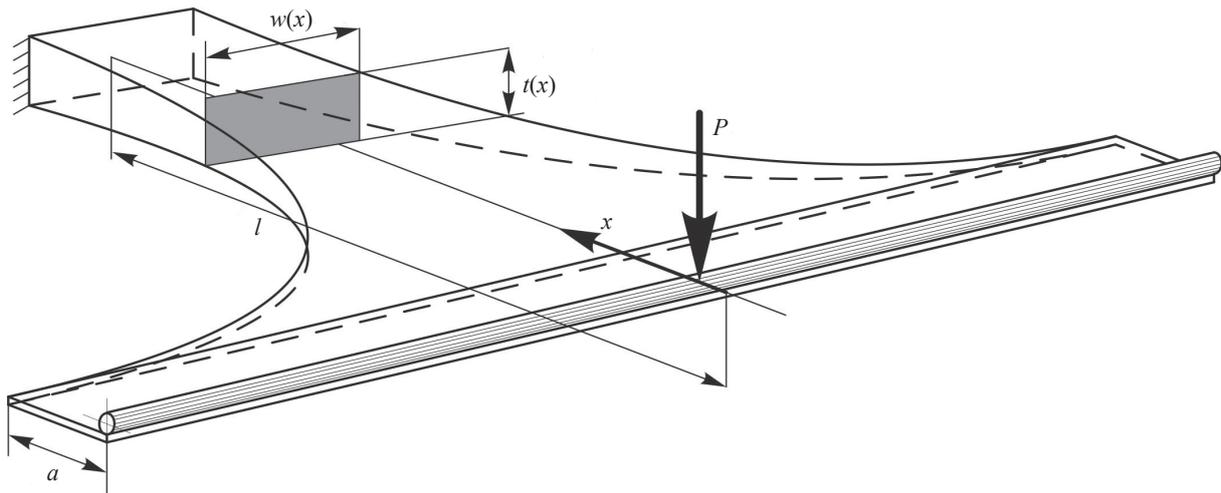


Рис. 14. Балка констэра (constant-area) с постоянной площадью поперечного сечения и концевым участком с постоянными размерами сечений

Fig. 14. Constant-area beam with end section with constant section dimensions

Дополнительное условие равнопрочности:

$$\frac{M(\bar{x})}{w(\bar{x})t(\bar{x})^2} = \frac{M(1)}{w(1)t(1)^2} \quad (22)$$

приводит из выражений (12), (19) к линейному соотношению

$$\alpha + 2\beta = \gamma. \quad (23)$$

Наилучшая для волокнистой композитной структуры балка констэра соответствует «правилу Леонардо» о сохранении площади поперечного сечения и числа волокон в каждом сечении и из выражений (19), (23):

$$\alpha + \beta = 0 \Rightarrow \alpha = -\gamma; \beta = \gamma. \quad (24)$$

Из одновременного выполнения условий формул (20) и (21) находятся необходимые размеры корневого сечения и масса рессоры для нагружения концевой силой:

$$m(l) = \rho w(1)t(1)l\delta_m = \frac{9\rho P_{\max}^2 E}{\sigma^2 C} \cdot \frac{\delta_m}{\delta_v}; \quad (25)$$

$$\delta_m = \frac{1}{1 + \alpha + \beta}.$$

Для любой балки нагруженной концевой силой коэффициент снижения массы $\delta_m/\delta_v = \delta_\Sigma$ для профилированной равнопрочной балки по сравнению с прямоугольной оказывается постоянным:

$$\delta_\Sigma = \frac{3 - \alpha - 3\beta}{3(1 + \alpha + \beta)} = \frac{1}{3}. \quad (26)$$

В общем случае $\delta_\Sigma = 1/(1 + 2\gamma)$ точно соответствует выражению (18) для идеально ветвящейся балки, нагруженной переменным моментом (12).

В работе [79] проведен анализ снижения массы ленточной пружины из профилированных полукольцев, показано, что в идеальном случае оно возможно только в два раза, что соответствует $\gamma = 1/2$, так как изменение изгибающего момента в диаметрально-

но сжимаемом полукольце пропорционально синусу полярного угла, т.е. «медленнее» линейного.

7. Аддитивные биомиметические технологии трехмерной печати изделий из волокнистых композитов

Недостаток опыта, отсутствие оборудования и специалистов, высокая стоимость компонентов — все это сдерживает широкое применение композитов в гражданском машиностроении. В то же время традиционные композитные технологии: намотка, выкладка, контактное формование, пултрузия, инжекционное формование, автоклавное формование в вакуумной мешке и др. обладают рядом принципиальных преимуществ по сравнению с металлическими технологиями. Вместо экологически вредной, энергоемкой, многоступенчатой технологической цепочки «добыча руды и коксующегося угля – выплавка чугуна – мартеновское выжигание углерода – прокатка – механическая обработка – сборка – покраска» возможна безотходная и безлюдная технология, не требующая ни высоких температур, ни значительных усилий «получение компонентов (волокон, матриц) – изготовление полуфабрикатов – создание изделия с окраской в массе».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По разделу 2

При выполнении условия (1) интересно оценить рациональную объемную долю волокон f_r . При $f < f_r$ разрушение начнется с разрыва волокон, при $f > f_r$ — с расщепления, и значит, количество волокон можно уменьшить, убрать избыток для данной прочности матрицы. Для современного стеклопластика получается рациональное содержание волокон $f_r \approx 20 \div 30 \%$, но материал с такой небольшой объемной долей волокон вряд ли заинтересует конструктора из-за невысоких прочностных и жест-

костных характеристик. Повышение объемной доли волокон оказывается недостаточно эффективным для роста продольной прочности, потому что композит расщепляется в зоне дефектов структуры, которые неизбежны при любом уровне технологий, поэтому необходимо существенно повышать сдвиговые характеристики связующего и стремиться к рациональным свойствам, созданным природой в древесине.

По разделу 3

Итерационная процедура моделирования оптимальной структуры армирования

После построения траекторий волокон необходимо провести еще раз анализ поля напряжений в пластине, армированной криволинейными волокнами. Теперь уже, в отличие от первой итерации, совместно с направлениями волокон, нужно учитывать изменение их локальной объемной доли. Аналитических решений подобных задач не существует, и возможна только итерационная процедура компьютерного моделирования. После построения окончательной структуры неоднородной криволинейной укладки волокон можно сравнить распределение локальных напряжений с прочностными характеристиками, чтобы сделать количественный вывод о повышении несущей способности пластины с отверстием за счет специальных траекторий «огибания» отверстия волокнами.

Расчеты показывают существенное снижение концентрации напряжений около отверстия. Если считать новый спроектированный, криволинейно анизотропный композит однородным, то для него теоретический коэффициент концентрации напряжений вблизи кругового отверстия снижается примерно в 1,5 раза, например, для первоначально однонаправленного углепластика от значения 5 до значения 3,3. Но более интересно оценить не теоретический коэффициент концентрации напряжений, а эффективный коэффициент снижения прочности. Для этого надо учитывать напряжения «в расчете на волокно», оцененные с учетом возрастания объемной доли волокон у контура отверстия.

Главный вывод состоит в том, что максимальное напряжение «в расчете на волокно» при оптимальной структуре армирования становится примерно в 3–4 раза меньше, чем при однородной прямолинейной укладке, т.е. эффективный коэффициент концентрации напряжений снижается от 5 до 1,3, и перегрузка волокон у дна отверстия составляет всего порядка 30 %. При этом крайне важно, что исчезают касательные напряжения, вызывающие расщепления около отверстий.

Очевидно, что вредное влияние концентрации напряжений в узлах крепления можно снизить, применяя специальную структуру армирования, согласующуюся с полем напряжений. Криволинейные траектории укладки волокон около отверстий позво-

ляют значительно повысить несущую способность и долговечность соединений. При снижении максимальных напряжений примерно в 2 раза циклическая долговечность может возрасти на два десятичных порядка (в 100 раз), вследствие слабого наклона кривых Велера в координатах «напряжение – логарифм числа циклов».

Модели накопления повреждений и запаздывающего разрушения

Важным направлением развития моделирования композитных структур с криволинейным армированием является применение критериев локального разрушения [32] и последовательной деградации свойств компонентов. Известно, что условие возникновения первого разрушения волокна, матрицы или границы раздела может быть выполнено задолго до исчерпания несущей способности композитной конструкции в целом. Для анализа процесса накопления повреждений [41, 42] используют разные критерии прочности, учитывающие различные механизмы разрушения: разрыв волокна, растрескивание матрицы, расщепление по границе раздела. Каждый подобный вид разрушения приводит к определенной деградации упругих свойств в конечном элементе, где с ростом нагрузки выполняется критерий того или иного вида разрушения. После локального разрушения проводится пересчет напряжений в конструкции с учетом локальной деградации свойств. Подобный итерационный алгоритм позволяет оценивать форму и размер поврежденной зоны около отверстия и более точно предсказывать критическую нагрузку при возникновении окончательного, лавинообразного, неустойчивого разрушения.

По разделу 4

С помощью полученных картин траекторий волокон можно обнаружить наиболее нагруженные волокна и сравнить напряжения в расчете на волокно (с учетом локальной объемной доли волокон) с концентрацией напряжений в исходной однородной пластине. Рациональное армирование приводит к существенному снижению локальных напряжений в расчете на волокно, исключению расщеплений и повреждений волокон и повышению (минимум на 50 %) несущей способности соединения.

В перспективе оптимальное проектирование не должно ограничиваться плоской задачей теории упругости, и это — одно из интересных направлений развития технологической механики композитов.

По разделу 5

Из выражения (11) можно понять, что существует такая малая длина звена трубы L^* , при которой знаменатель обращается в ноль, т.е. расщепление не может возникнуть ни при каком крутящем моменте M^+ . Эта величина очень похожа на длину

бамбукового звена, которую выбирает природа для исключения преждевременного расщепления. Звено бамбука растет, пока не «почувствует», что может возникнуть тот или иной механизм разрушения, и тогда появляется сдерживающая расщепление диафрагма. Представление о том, что растение «чувствует» нагрузку, отнюдь не является фантастикой. Стебли обычной малины, например, растут до длины метр–полтора, а затем начинают изгибаться под собственным весом и перестают расти. Но если их искусственно вывесить и снять весовую нагрузку, то обычные кусты могут вырасти до шести метров.

По разделу 6

Ветвящиеся равнонапряженные композитные упругие элементы столь же эффективны, как и профилированные балки с постоянной площадью поперечного сечения (констрэра), но преимущество ветвления по сравнению с профилированием состоит в сохранении непрерывного прямолинейного армирования и в возможности уменьшения габаритов при сборке «ветвей» в пучок. Это напоминает замену одного широкого треугольного листа рессоры на пакет более узких листов с линейно уменьшающейся длиной.

Создание специальной формы и структуры армирования образцов для корректного определения прочности однонаправленных композитов

Методы испытания однонаправленных композитов на растяжения потребовали многолетней отработки [80–83]. Ни сверление, ни создание галтелей для подобных материалов недопустимы: при нагружении возникнут расщепления вдоль волокон.

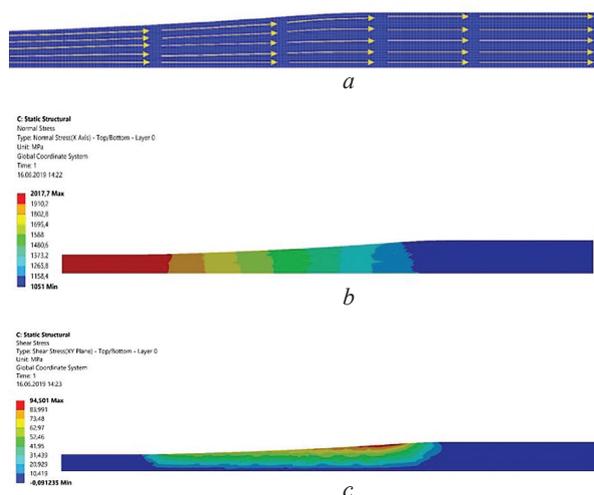


Рис. 15. Образец с криволинейной укладкой волокон (а), распределение в нем нормальных (b) и касательных (с) напряжений

Fig. 15. Curvilinear fibers trajectories specimen (a), distribution of normal stresses (b) and shear stresses (c) in the specimen

Поэтому стандартизованы испытания только гладких прямоугольных образцов, но на результаты испытаний оказывает сильное влияние концентрация напряжений около захватов.

Перспективным направлением кажется создание специального биоподобного образца класса констрэра с плавным переходом от рабочей части к более широкой, захватной части (рис. 15) с расположением волокон по рассчитанным, равнонапряженным криволинейным траекториям [84].

Идею создания подобных образцов подсказывает народный опыт строительства изб на Севере. Стропило готовится из ствола молодой ели и утолщенным комлем — местом перехода ствола в корень, это стропило закрепляют на коньке. Никакой силой место соединения «ствол-комель» нельзя разрушить: оно, может, не очень изящное, но гораздо надежнее крепления гвоздями.

Результаты моделирования полей напряжений в профилированных образцах МКЭ (рис. 15) показывают, что рациональное, криволинейное армирование снижает влияние концентрации напряжений в захватной части образца, и критическая нагрузка для образца с криволинейным армированием примерно на 40 % превышает критическую нагрузку для однонаправленно армированного образца с аналогичными галтелями.

По разделу 7

Аддитивные технологии трехмерной печати делают создание оптимальных конструкций с криволинейными траекториями укладки волокон более доступными [85–98]. С помощью принтеров, печатающих пластиком с одновременным армированием волокон, удастся изготавливать биоподобные узлы крепления [93, 94], значительно более эффективные, чем традиционные металлоподобные крепления.

Поскольку эти технологии не требуют высоких температур и значительных усилий формования, в перспективе возможно создание технологических участков для изготовления и ремонта композитных элементов оборудования непосредственно на орбите [99, 100], а в далекой перспективе — на Луне (Марсе), если возникнет потребность. Технологии металлов, привычные на Земле, явно проигрывают в труднодоступных местах, и в частности, в космосе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проектирование и изготовление искусственных материалов-конструкций из волокнистых композитов с использованием природных принципов проектирования — одна из наиболее перспективных тенденций развития конструкционного материаловедения. Такое моделирование возможно на различных структурных уровнях. Главная задача, выполняемая конструкционными композитами, — одновременное обеспечение прочности

и трещиностойкости. На микроуровне нужно исследовать механизмы задержки трещин за счет микрорастрескивания, «псевдопластических» деформаций перед ее фронтом, затупляющих трещину и снижающих хрупкость древесины, кости. На мини-уровне нужно использовать природные механизмы задержки трещины за счет изменения ее траектории движения вдоль непрочных границ раздела или путем создания связей-мостиков, соединяющих ее берега за фронтом трещины. На макроуровне, который в основном рассматривался в данной статье, ставится задача моделирования биоподобных, равнонапряженных структур с криволинейным армированием, проектируемых под заданные условия нагружения.

Следует указать три наиболее перспективных, на наш взгляд, и связанных между собой направления в макромеханике композитов, которые требуют дальнейших исследований. Это — *биомеханика прочности, компьютерное моделирование оптимальных структур и технологическая механика композитов.*

Эффективность создания и применения новых конструктивных армированных пластиков определяется не столько классической механикой твердого тела, сколько *технологической механикой*, теоретическим изучением и экспериментальной отработкой технологических решений. Традиционное для технологии композитов армирование тканями или препрегами — это скорее следствие развития текстильной промышленности и ее технологического оборудования, чем осознанный выбор конструктора.

В условиях производства конструкторы-композитчики находятся, как правило, в рамках материалов с прямолинейной или цилиндрической анизотропией, хотя с помощью современных 3D-принтеров уже можно создавать структуры с произвольным армированием. Методы и способы крепления композитных элементов до сих пор находятся под влиянием металлических технологий, и, как правило, оказываются малоэффективными. Соединения, перенимающие у природы опыт по созданию прочных биологических способов крепления, пока еще далеки от массового применения.

Для иллюстрации и продвижения таких принципиально новых для композитных технологий решений особенно важна роль *биомеханики прочности* и ее перспективной ветви, изучающей материалы с криволинейной анизотропией. И в этом направлении заявляет свои права сравнительно новое направление *компьютерного моделирования*, в рамках которого возможна совместная оптимизация структуры армирования и формы композитного изделия (*CAIO — Computer Aided Internal Optimisation*). Если при расчете НДС конструкций вариационные методы, реализованные в пакетах МКЭ, дают преимущество лишь в скорости расчета, то в области моделирования растущих, «живых» материалов и систем возможности компьютерного моделирования поистине незаменимы. Растущая структура, например дерево, реагирует на внешние воздействия, что невозможно учесть традиционными системами уравнений теории анизотропной упругости. Но компьютер с помощью большого количества переборочных вариантов позволяет, заменяя миллионлетний естественный отбор, найти рациональную (например, равнонапряженную) структуру волокнистого композитного материала. Это направление будет интересно, в первую очередь, молодым исследователям: с одной стороны, привлекательность важности применения композитов в космических, авиационных, транспортных системах, в строительстве, медицине и спорте; с другой стороны, это — бесконечно глубокая, фундаментальная задача познания секретов природы; и — это любимое молодежью общение с компьютером, который в данном случае становится не просто удобным, но принципиально необходимым средством моделирования.

Почему именно биомеханика прочности, именно изучение опыта природы кажутся нам наиболее интересными направлениями механики композитов? Потому что мы касаемся воистину непознаваемых секретов живых конструкций. Познавая шаг за шагом природу, мы изучаем более совершенные, чем в технике, принципы оптимизации структур и конструкций. Именно в направлении моделирования биотехнологий и биоматериалов должен произойти новый прорыв в создании композитных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cranford S.W., Tarakanova A., Pagno N.M., Buehler M.J. Nonlinear material behavior of spider silk yield robust webs // *Nature*. 2012. Vol. 482. P. 72–78. DOI: 10.1038/nature 10739
2. Chen P., Lin A.Y., McKittrick J., Meyers M.A. Structure and mechanical properties of crab exoskeletons // *Acta Biomaterialia*. 2008. Vol. 4. Pp. 587–596. DOI: 10.1016/j.actbio.2007.12.010
3. Studart A.R. Biological and bioinspired composites with spatially tunable heterogeneous architec-

- tures // *Advanced Functional Materials*. 2013. Vol. 23. Pp. 4423–4436. DOI: 10.1002/adfm.201300340
4. Carlsson J., Isaksson P. Simulating fracture in a wood microstructure using high resolution dynamic phase field model // *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Vol. 232. P. 107030. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107030
5. Ghorbani M., Poozzahed N., Amininasab S.M. Morphological, physical and mechanical properties of silanized wood-polymer composite // *Journal of Com-*

posite Materials. 2019. Vol. 54. Issue 11. Pp. 1403–1412. DOI: 10.1177/0021998319881493

6. Muller U., Gindl-Altmutter W., Konnerth J., Maier G.A., Keckes J. Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1038/srep14522

7. Scheperboer I.C., Suiker A.S.J., Luimes R.A., Bosco E., Jorissen A.J.V. Collapse response of two-dimensional cellular solids by plasticity and cracking: application to wood // International Journal of Fracture. 2019. Pp. 221–244. DOI: 10.1007/s 10704-019-00392-8

8. Wegst Ulrike G.K., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P., Ritchie R.O. Bioinspired Structural Materials // Nature Materials. 2015. Vol. 14. Pp. 23–36. DOI: 10.1038/nmat4089

9. Ванин Г.А. Моментная механика композитов // Механика композитных материалов. 2001. Т. 36. С. 621–654.

10. Ванин Г.А. Упругость неоднородных сред с иерархией структуры // Известия РАН. Механика твердого тела. 2000. № 5. С. 85–106.

11. Wang J., Crouch S.L., Mogilevskaya S.G. Numerical modeling of the elastic behavior of fiber-reinforced composites with inhomogeneous interphases // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66. Issue 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.06.006

12. Jiang C.P. et al. A rigorous analytical method for doubly periodic cylindrical inclusions under longitudinal shear and its application // Mechanics of Materials. 2004. Vol. 36. Issue 3. Pp. 225–237. DOI: 10.1016/S0167-6636(03)00010-3

13. Andrianov I.V., Danishevs'kyi V.V., Kalamkarov A.L. Micromechanical analysis of fiber-reinforced composites on account of influence of fiber coatings // Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Issue 5. Pp. 874–881. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.10.002

14. Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол. М. : «Мир», 1971. 272 с.

15. Полилов А.Н. Торможение трещины поверхностью раздела // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1974. № 1. С. 68–72.

16. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2018. 328 с.

17. Немировский Ю.В., Федорова Н.А. Исследование рациональных структур криволинейного армирования в полярной системе координат // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2013. № 1 (30). С. 233–244. DOI: 10.14498/vsgtu1164

18. Федорова Н.А. Математическое моделирование предельных деформаций плоских конструкций, армированных вдоль криволинейных траекторий // Вестник Сибирского государственного аэро-

космического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 1 (53). С. 91–94.

19. Safonov A.A. 3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method // Composite Structures. 2019. Vol. 215. Pp. 289–297. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.063

20. Honda S., Igarashi T., Narita Y. Multi-objective optimization of curvilinear fiber shapes for laminated composite plates by using NSGA-II // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 45. Pp. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.056

21. Spickenheuer A., Schulz M., Gliesche K., Heinrich G. Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures // Plastics, Rubber and Composites. Macromolecular Engineering. 2008. Vol. 37. Issue 5. Pp. 227–232. DOI: 10.1179/174328908X309448

22. Shafiqhfarid T., Demir E., Yildiz M. Design of fiber-reinforced variable-stiffness composites for different open-hole geometries with fiber continuity and curvature constraints // Composite Structures. 2019. Vol. 226. P. 111280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111280

23. Setoodeh S., Gurdal Z. Design of composite layers with curvilinear fiber paths using cellular automata // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2003. DOI:10.2514/6.2003-2003

24. Lemaire E., Zein S., Bruyneel M. Optimization of composite structures with curved fiber trajectories // Composite Structures. 2015. Vol. 131. Issue 5. Pp. 895–904. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.06.040

25. Pedersen P. Examples of density, orientation, and shape-optimal 2D-design for stiffness and/or strength with orthotropic materials // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2004. Vol. 26. Issue 1. Pp. 37–49. DOI: 10.1007/s00158-003-0295-6

26. Hyer M.W., Charette R.F. The use of curvilinear fiber format in composite structure design // AIAA Journal. 1991. Vol. 29. Issue 6. Pp. 1011–1015. DOI:10.2514/3.10697

27. Papapetrou V.S., Patel C., Tamijani A.Y. Stiffness-based optimization framework for the topology and fiber paths of continuous fiber composites // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 183. P. 107681. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107681

28. Lin H.J., Lee Y.J. Strength of composite laminates with continuous fiber around a circular hole // Composite Structures. 1992. Vol. 21. Pp. 155–162. DOI: 10.1016/0263-8223(92)90015-5

29. Zhang H., Dickson A.N., Sheng Y., McGrail T., Dowling D.P., Wang C. et al. Failure analysis of 3D printed woven composite plates with holes under tensile and shear loading // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 186. P. 107835. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107835

30. Crothers P.J., Drechsler K., Feltn D., Herszberg I., Kruckenberg T. Tailored fibre placement to minimise stress concentrations // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997. Vol. 28. Issue 7. Pp. 619–625. DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00022-5
31. Gliesche K., Hübner T., Orawetz H. Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an “open-hole” tension plate from carbon/epoxy laminates // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63. Issue 1. Pp. 81–88. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00178-1
32. Ferreira R.T.L., Ashcroft I.A. Optimal orientation of fibre composites for strength based on Hashin’s criteria optimality conditions // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. Vol. 61. Pp. 2155–2176. DOI: 10.1007/s00158-019-02462-w
33. Zhu Y., Liu J., Liu D., Xu H., Hui D. Fiber path optimization based on a family of curves in composite laminate with a center hole // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 111. Pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.051
34. Huang J., Haftka R.T. Optimization of fiber orientation near a hole for increased load-carrying capacity of composite laminates // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2005. Vol. 30. Issue 5. Pp. 335–341. DOI: 10.1007/s00158-005-0519-z
35. Cho H.R., Rowlands R.E. Optimizing fiber direction in perforated orthotropic media to reduce stress concentration // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. Issue 10. Pp. 1177–1198. DOI: 10.1177/0021998308103608
36. Jasso A.M., Goodsell J.E., Ritchey A.J., Pipes R.B., Koslowski M. A parametric study of fiber volume fraction distribution on the failure initiation location in open hole off-axis tensile specimen // *Composites science and technology*. 2011. Vol. 71. Issue 16. Pp. 1819–1825. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.08.008
37. Zhu Y., Qin Y., Qi S., Xu H., Liu D., Yan C. Variable angle tow reinforcement design for locally reinforcing an open-hole composite plate // *Composite Structures*. 2018. Vol. 202. Pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.021
38. Muc A. Effectiveness of optimal design with respect to computational models for laminated composite structures weakened by holes // *Structural optimization*. 1998. Vol. 16. Issue 1. Pp. 58–67. DOI: 10.1016/0263-8223(88)90005-0
39. Малахов А.В., Полилов А.Н. Построение траекторий волокон, огибающих отверстие, и их сравнение со структурой древесины в зоне сучка // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 4. С. 57–62.
40. Malakhov A.V., Polilov A.N. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres using FEM // *Compos. Part A*. 2016. Vol. 87. Pp. 323–328. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.04.005
41. Camanho P.P., Matthews F.L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates // *J. Compos. Mater.* 1999. Vol. 33. Pp. 2248–2280. DOI: 10.1177/002199839903302402
42. Malakhov A.V., Polilov A.N., Tian X. Progressive failure analysis of variable stiffness composite structures // *Citation: AIP Conference Proceedings* 2018. P. 030038. DOI: 10.1063/1.5084399
43. Гоцелюк Т.Б., Гришин В.И., Коваленко Н.А. Исследование прочности болтовых соединений в слоистых композитах с использованием модели прогрессирующего разрушения // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2016. Т. 22. № 2. С. 225–244.
44. Tserpes K.I., Labeas G., Papanikos P., Kermandis Th. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates // *Composites Part B: Engineering*. 2002. Vol. 33. Issue 3. 521–529. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00033-1
45. Xiao Y., Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation) // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. Pp. 1022–1031. DOI: 10.1016/J.COMPSCITECH.2005.02.011
46. Полилов А.Н. Этюды по механике композитов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. 320 с.
47. Li R., Kelly D., Crosky A. Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole // *Compos. Struct.* 2002. Vol. 57. Pp. 377–383. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00105-8
48. Langella, Durante M. Comparison of Tensile Strength of Composite Material Elements with Drilled and Molded-in Holes // *Appl. Compos. Mater.* 2008. Vol. 15. Pp. 227–239. DOI: 10.1007/s10443-008-9069-z
49. Кокина Т.М., Шафигуллин Л.Н. Оценка влияния свойств композитных материалов на параметры болтовых соединений деталей // *Прикладная физика*. 2018. № 4. С. 106–110.
50. Meram A., Can A. Experimental investigation of screwed joints capabilities for the CFRP composite laminates // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 176. P. 107142. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107142
51. Grüber B., Hufenbach W., Kroll L., Lopper M., Zhou B. Stress concentration analysis of fibre-reinforced multilayered composites with pin-loaded holes // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. Issue 7. Pp. 1439–1450. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.04.005
52. Zhao T., Palardy G., Villegas I.F., Rans C., Benedictus R. Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 112. Pp. 224–234. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.028

53. Burns L., Mouritz A.P., Pook D., Feih S. Bio-inspired hierarchical design of composite T-joints with improved structural properties // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 69. Pp. 222–231. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.041
54. Akrami R., Fotouhi S., Fotouhi M., Bodaghi M., Bolouri A. High-performance bio-inspired composite T-joints // *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 184. P. 107840. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107840
55. Kelly D., Crosky A., Schoen H., Smollich L. Improving the efficiency of fiber steered composite joints using load path trajectories // *J. Compos. Mater.* 2006. Vol. 40. Pp. 1645–1658. DOI: 10.1177/0021998306060168
56. Koricho E.G., Khomenko A., Fristedt T., Haq M. Innovative tailored fiber placement technique for enhanced damage resistance in notched composite laminate // *Compos. Struct.* 2015. Vol. 120. Pp. 378–385. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.10.016
57. Robinson M.J., Adams T.C. Performance of FRP composite lap joints utilizing fiber tow steering // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 190. P. 107910. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107910
58. Polilov A.N., Tatus N.A., Kamantsev I.S., Kuznetsov A.V., Akhmedshin E.Kh., Tian X. Reducing the effect of holes on the bearing capacity of fiber-reinforced materials. AIP Conference Proceedings 2019. Vol. 2176. P. 030010. DOI: 10.1063/1.5135134
59. Tosh M.W., Kelly D.W. On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000. Vol. 31. Issue 10. Pp. 1047–1060. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00063-4
60. Akhmedshin E.Kh., Polilov A.N., Tatus' N.A. Holes manufacturing technology influence on the strength of fibrous composites // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 747. P. 012096. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012096
61. Schulgasser K., Witzum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems // *Annals of Botany*. 1997. Vol. 80. Pp. 35–44. DOI: 10.1006/anbo.1997.0404
62. Inoue A., Kuraoka K., Kitahara F. Mathematical expression for the relationship between internode number and internode length for bamboo, *Phyllostachys Pubescens* // *Journal of Forestry Research*. 2012. Vol. 23. Issue 3. Pp. 435–439. DOI: 10.1007/s11676-012-0281-1
63. Zou M., Xu S., Wei C., Wang H., Liu Z. A bionic methods for the crashworthiness design of thin walled structures inspired by bamboo // *Thin Walled Structures*. 2016. Vol. 101. Pp. 222–230. DOI: 10.1016/j.tws.2015.12.023
64. Harte A.-M., Fleck A. Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion // *Acta Mater.* 2000. Vol. 48. Pp. 1259–1271. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00427-9
65. Wegst U.G.K., Ashby M.F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes // *J. Mater. Sci.* 2007. Vol. 42. Pp. 9005–9014. DOI: 10.1007/s10853-007-1936-8
66. Работнов Ю.Н., Полилов А.Н. О разрушении композитных труб по форме китайского фонарика // *Механика композитных материалов*. 1983. № 3. С. 548–550.
67. Плитов И.С., Полилов А.Н. Рациональные размеры звена бамбука или композитной трубы, подверженной сжатию, изгибу и кручению // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2015. № 3. С. 58–69.
68. Mattheck C. Design in nature: learning from trees. Springer, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-58747-4
69. Eloy C. Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 107. Issue 25. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.258101
70. Minamino R., Tateno M. Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. Issue 4. P. 9535. DOI: 10.1371/journal.pone.0093535
71. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Проектирование разветвляющихся или профилированных композитных элементов по аналогии со структурой кроны дерева // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. № 4. С. 76–84.
72. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Тянь Ш. Профилированные и ветвящиеся аналоги многолиственной треугольной рессоры // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2018. № 4. С. 211–214. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.19
73. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Проектирование равнопрочных профилированных, разветвленных или расслоенных упругих композитных элементов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 5 (698). С. 3–12. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-5-3-12
74. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Арутюнова А.С., Тянь Ш. Равнопрочные ветвящиеся композитные балки с постоянной суммарной площадью переменных эллиптических сечений // *Механика композитных материалов*. 2019. Т. 55. № 3. С. 465–482.
75. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Плитов И.С. Оценка влияния разориентации волокон на жесткость и прочность профилированных композитных элементов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 5. С. 58–67.
76. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Тянь Ш. Анализ корректности задач об изгибе равнопрочных композитных профилированных балок // *Прикладная механика и техническая физика*. 2019. № 1. С. 167–180. DOI: 10.15372/PMTF20190118

77. *Полилов А.Н., Татусь Н.А., Тянь Ш.* Анализ эффективности равнопрочных композитных листовых рессор при различных условиях нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 5. С. 59–69.
78. *Polilov A.N., Tatus' N.A.* Features of Composite Beams Bending Analysis by Energy Methods // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 489. P. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/489/1/012023
79. *Полилов А.Н., Татусь Н.А., Жавыркин В.В., Тянь Ш.* Анализ эффективности кольцевых и ленточных пружин из стеклопластика // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0235711920030098
80. *Portnov G.G., Kulakov V.L., Arnautov A.K.* Grips for the transmission of tensile loads to a FRP strip // Mechanics of Composite Materials. 2013. Vol. 49. № 5. Pp. 457–474. DOI: 10.1007/s11029-013-9363-1
81. *Zhai Zh., Gröschel C., Drummer D.* Tensile behavior of quasi-unidirectional glass fiber/polypropylene composites at room and elevated temperatures // Polymer Testing. 2016. Vol. 54. Pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.003
82. *Czél G., Jalalvand M., Wisnom M.R.* Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Vol. 91. Issue 2. Pp. 436–447. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.07.021
83. *Lee J.-M., Moon J.-S., Shim D., Choi B.-H.* Effect of glass fiber distributions on the mechanical and fracture behaviors of injection-molded glass fiber-filled polypropylene with 2-Hole Tension specimens // Composites Science and Technology. 2019. Vol. 170. Issue 1. Pp. 190–199. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.11.038
84. *Zhavyrkin V.V., Polilov A.N., Arutjunova A.S., Tatus' N.A.* Correct FRP tensile specimen // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 747. P. 012136. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012136
85. *Dickson A.N., Barry J.N., McDonnell K.A., Dowling D.P.* Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 16. Pp. 146–152. DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.004
86. *Li N., Link G., Wang T., Ramopoulos V., Neumaier D., Hofele J. et al.* Path-designed 3D printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 182. P. 107612. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107612
87. *Brooks H., Molony S.* Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement // Materials and Design. 2016. Vol. 90. Pp. 276–283. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.123
88. *Balla V.M., Kate K.H., Satyavolu J., Singh P., Ganesh J., Tadimeteti D.* Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 174. P. 106956. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106956
89. *Khan S., Fayazbakhsh K., Fawaz Z., Nik M.A.* Curvilinear variable stiffness 3D printing technology for improved open-hole tensile strength // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 24. Pp. 378–385. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.013
90. *Chacón J.M., Caminero M.A., Núñez P.J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J.M.* Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties // Composites Science and Technology. 2019. Vol. 181. P. 107688. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107688
91. *Velasco-Hogan A., Xu J., Meyers M. A.* Additive manufacturing as a method to design and optimize bioinspired structures // Advanced Materials. 2018. Vol. 30. P. 1800940. DOI: 10.1002/adma.201800940
92. *Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T.-K., Asahara H., Horiguchi K. et al.* Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 23058. DOI: 10.1038/srep23058
93. *Malakhov A., Polilov A., Zhang J., Hou Z., Tian X.* A modeling method of continuous fiber paths for additive manufacturing (3D printing) of variable stiffness composite structures // Applied Composite Materials. 2020. Vol. 27. Pp. 185–208. DOI: 10.1007/s10443-020-09804-8
94. *Wang Q., Tian X., Huang L., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N.* Programmable morphing composites with embedded continuous fibers by 4D printing // Materials & Design. 2018. Vol. 155. Pp. 404–413. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.027
95. *Zhang H., Yang D., Sheng Y.* Performance-driven 3D printing of continuous curved carbon fibre reinforced polymer composites: A preliminary numerical study // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 151. P. 256–264. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.06.017
96. *Hou Z., Tian X., Zhang J., Zhe L., Zheng Z., Li D. et al.* Design and 3D printing of continuous fiber reinforced heterogeneous composites // Composite Structures. 2020. Vol. 237. P. 111945. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111945
97. *Hou Z., Tian X., Zheng Z., Zhang J., Zhe L., Li D. et al.* A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content // Composites Part B: Engineering. 2020. P. 107893. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107893.

98. Sugiyama K., Matsuzaki R., Malakhov A.V., Polilov A.N., Ueda M., Todoroki A. et al. 3D Printing of Optimized Composites with Variable Fiber Volume Fraction and Stiffness using Continuous Fiber // *Composites Science and Technology*. 2020. Vol. 186. P. 107905. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107905

99. Dell'Anno G., Partridge I., Cartié D., Hamlyn A., Chehura E., James S.W. et al. Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite

structures // *International Journal of Structural Integrity*. 2010. Vol. 3. Issue 1. Pp. 22–40. DOI: 10.1108/17579861211209975

100. Мисоченко А.А., Прожега М.В., Саламандра К.Б., Татусь Н.А., Шохин А.Е. Орбитальный технологический комплекс (ОРТеК) для производства композитных конструкций в открытом космосе // *Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики*. 2015. С. 64–65.

Поступила в редакцию 31 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 23 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 23 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Николаевич Полилов — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией «Безопасность и прочность композитных конструкций»; **Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук (ИМАШ РАН)**; 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; SPIN-код: 4392-2715, РИНЦ ID: 5914, Scopus: 6603583004, ORCID: 0000-0002-0990-5178; polilovan@mail.ru;

Николай Алексеевич Татусь — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Безопасность и прочность композитных конструкций»; **Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук (ИМАШ РАН)**; 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2706-2817, РИНЦ ID: 157336, Scopus: 12039478400, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

REFERENCES

1. Cranford S.W., Tarakanova A., Pagno N.M., Buehler M.J. Nonlinear material behavior of spider silk yield robust webs. *Nature*. 2012; 482:72-78. DOI: 10.1038/nature 10739. DOI: 10.1038/nature10739
2. Chen P., Lin A.Y., McKittrick J., Meyers M.A. Structure and mechanical properties of crab exoskeletons. *Acta Biomaterialia*. 2008; 4:587-596. DOI: 10.1016/j.actbio.2007.12.010
3. Studart A.R. Biological and bioinspired composites with spatially tunable heterogeneous architectures. *Advanced Functional Materials*. 2013; 23:4423-4436. DOI: 10.1002/adfm.201300340
4. Carlsson J., Isaksson P. Simulating fracture in a wood microstructure using high resolution dynamic phase field model. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020; 232:107130. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107030
5. Ghorbani M., Poozzahed N., Amininasab S.M. Morphological, physical and mechanical properties of silanized wood-polymer composite. *Journal of Composite Materials*. 2020; 54(11):1403-1412. DOI: 10.1177/0021998319881493
6. Muller U., Gindl-Altmutter W., Konnerth J., Maier G.A., Keckes J. Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces. *Scientific Reports*. 2015; 5(1). DOI: 10.1038/srep14522
7. Schepherboer I.C., Suiker A.S.J., Luimes R.A., Bosco E., Jorissen A.J.V. Collapse response of two-dimensional cellular solids by plasticity and cracking: application to wood. *International Journal of Fracture*. 2019; 219:221-244. DOI: 10.1007/s 10704-019-00392-8
8. Wegst Ulrike G.K., Bai H., Saiz E., Tomasia A.P., Ritchie R.O. Bioinspired Structural Materials. *Nature Materials*. 2015; 14:23-36. DOI: 10.1038/nmat4089
9. Vanin G.A. Moment mechanics of composites. *Mechanics of composite materials*. 2001; 36:621-654. (rus.).
10. Vanin G.A. Elasticity of heterogeneous environment with a hierarchy of structure. *Izvestia RAS. Solid mechanics*. 2000; 5:85-106. (rus.).
11. Wang J., Crouch S.L., Mogilevskaya S.G. Numerical modeling of the elastic behavior of fiber-reinforced composites with inhomogeneous interphases. *Composites Science and Technology*. 2006; 66(1):1-18. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.06.006
12. Jiang C.P. et al. A rigorous analytical method for doubly periodic cylindrical inclusions under longitudinal shear and its application. *Mechanics of Materials*. 2004; 36(3):225-237. DOI: 10.1016/S0167-6636(03)00010-3
13. Andrianov I.V., Danishevs'ky V.V., Kalamkarov A.L. Micromechanical analysis of fiber-reinforced composites on account of influence of fiber coatings. *Composites Part B: Engineering*. 2008; 39(5):874-881. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.10.002
14. Gordon J. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. 2012; 400. DOI: 10.1007/978-1-4615-9074-3

15. Polilov A.N. Crack braking by the interface. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Solid mechanics*. 1974; 1:68-72. (rus.).
16. Polilov A.N., Tatus N.A. *Biomechanics of the strength of fibrous composites*. Moscow, FIZMATLIT, 2018; 328. (rus.).
17. Nemirovsky Yu.V., Fedorova N.A. Study of rational structures of curvilinear reinforcement in the polar coordinate system. *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*. 2013; 1(30):233-244. (rus.).
18. Fedorova N.A. Mathematical modeling of limit deformations of flat structures reinforced along curved trajectories. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2014; 1(53):91-94. (rus.).
19. Safonov A.A. 3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method. *Composite Structures*. 2019; 215:289-297. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.063
20. Honda S., Igarashi T., Narita Y. Multi-objective optimization of curvilinear fiber shapes for laminated composite plates by using NSGA-II. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 45:1071-1078. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.056
21. Spickenheuer A., Schulz M., Gliesche K., Heinrich G. Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. *Plastics, Rubber and Composites. Macromolecular Engineering*. 2008; 37(5):227-232. DOI: 10.1179/174328908X309448
22. Shafighard T., Demir E., Yildiz M. Design of fiber-reinforced variable-stiffness composites for different open-hole geometries with fiber continuity and curvature constraints. *Composite Structures*. 2019; 226:111280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111280
23. Setoodeh S., Gurdal Z. Design of composite layers with curvilinear fiber paths using cellular automata. *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. 2003. DOI: 10.2514/6.2003-2003
24. Lemaire E., Zein S., Bruyneel M. Optimization of composite structures with curved fiber trajectories. *Composite Structures*. 2015; 131(5):895-904. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.040
25. Pedersen P. Examples of density, orientation, and shape-optimal 2D-design for stiffness and/or strength with orthotropic materials. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004; 26(1):37-49. DOI: 10.1007/s00158-003-0295-6
26. Hyer M.W., Charette R.F. The use of curvilinear fiber format in composite structure design. *AIAA Journal*. 1991; 29(6):1011-1015. DOI: 10.2514/3.10697
27. Papapetrou V.S., Patel C., Tamijani A.Y. Stiffness-based optimization framework for the topology and fiber paths of continuous fiber composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 183:107681. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107681
28. Lin H.J., Lee Y.J. Strength of composite laminates with continuous fiber around a circular hole. *Composite Structures*. 1992; 21:155-162. DOI: 10.1016/0263-8223(92)90015-5
29. Zhang H., Dickson A.N., Sheng Y., McGrail T., Dowling D.P., Wang C. et al. Failure analysis of 3D printed woven composite plates with holes under tensile and shear loading. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 186:107835. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107835
30. Crothers P. J., Drechsler K., Feltin D., Herszberg I., Kruckenberg T. Tailored fibre placement to minimise stress concentrations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997; 28(7):619-625. DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00022-5
31. Gliesche K., Hübner T., Orawetz H. Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an “open-hole” tension plate from carbon/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*. 2003; 63(1):81-88. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00178-1
32. Ferreira R.T.L., Ashcroft I.A. Optimal orientation of fibre composites for strength based on Hashin’s criteria optimality conditions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020; 61:2155-2176. DOI: 10.1007/s00158-019-02462-w
33. Zhu Y., Liu J., Liu D., Xu H., Hui D. Fiber path optimization based on a family of curves in composite laminate with a center hole. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 111:91-102. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.051
34. Huang J., Haftka R.T. Optimization of fiber orientation near a hole for increased load-carrying capacity of composite laminates. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2005; 30(5):335-341. DOI: 10.1007/s00158-005-0519-z
35. Cho H.R., Rowlands R.E. Optimizing fiber direction in perforated orthotropic media to reduce stress concentration. *Journal of Composite Materials*. 2009; 43(10):1177-1198. DOI: 10.1177/0021998308103608
36. Jasso A.M., Goodsell J.E., Ritchey A.J., Pipes R.B., Koslowski M. A parametric study of fiber volume fraction distribution on the failure initiation location in open hole off-axis tensile specimen. *Composites science and technology*. 2011; 71(16):1819-1825. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.08.008
37. Zhu Y., Qin Y., Qi S., Xu H., Liu D., Yan C. Variable angle tow reinforcement design for locally reinforcing an open-hole composite plate. *Composite Structures*. 2018; 202:162-169. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.021
38. Muc A. Effectiveness of optimal design with respect to computational models for laminated composite structures weakened by holes. *Structural optimization*. 1998; 16(1):58-67. DOI: 10.1016/0263-8223(88)90005-0

39. Malakhov A.V., Polilov A.N. Construction of trajectories of the fibers which bypass a hole and their comparison with the structure of wood in the vicinity of a knot. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013; 42(4):306-311. DOI: 10.3103/S1052618813040080 (rus.).
40. Malakhov A.V., Polilov A.N. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres using FEM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016; 87:323-328. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.04.005
41. Camanho P.P., Matthews F.L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. *Journal of Composite Materials*. 1999; 33:2248-2280. DOI: 10.1177/002199839903302402
42. Malakhov A.V., Polilov A.N., Tian X. Progressive failure analysis of variable stiffness composite structures. *AIP Conference Proceedings*. 2018; 2053:030038. DOI: 10.1063/1.5084399
43. Gotselyuk T.B., Grishin V.I., Kovalenko N.A. Study of the strength of bolt joints in layered composites using the model of progressive destruction. *Mechanics of composite materials and structures*. 2016; 22(2):225-244. (rus.).
44. Tserpes K.I., Labeas G., Papanikos P., Kermanidis Th. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2002; 33:521-529. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00033-1
45. Xiao Y., Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation). *Composites Science and Technology*. 2005; 65:1022-1031. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.02.011
46. Polilov A.N. *Etudes on the mechanics of composites*. Moscow, FIZMATLIT, 2015; 320. (rus.).
47. Li R., Kelly D., Crosky A. Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole. *Composite Structures*. 2002; 57:377-383. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00105-8
48. Langella, Durante M. Comparison of tensile strength of composite material elements with drilled and molded-in holes. *Applied Composite Materials*. 2008; 15:227-239. DOI: 10.1007/s10443-008-9069-z
49. Kokina T.M., Shafigullin L.N. Assessment of the effect of the properties of composite materials on the parameters of bolted joints of parts. *Applied physics*. 2018; 4:106-110. (rus.).
50. Meram A., Can A. Experimental investigation of screwed joints capabilities for the CFRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 176:107142. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107142
51. Grüber B., Hufenbach W., Kroll L., Lepper M., Zhou B. Stress concentration analysis of fibre-reinforced multilayered composites with pin-loaded holes. *Composites Science and Technology*. 2007; 67(7):1439-1450. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.04.005
52. Zhao T., Palardy G., Villegas I.F., Rans C., Benedictus R. Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 112:224-234. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.028
53. Burns L., Mouritz A.P., Pook D., Feih S. Bio-inspired hierarchical design of composite T-joints with improved structural properties. *Composites Part B: Engineering*. 2015; 69:222-231. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.041
54. Akrami R., Fotouhi S., Fotouhi M., Boddaghi M., Bolouri A. High-performance bio-inspired composite T-joints. *Composites Science and Technology*. 2019; 184:107840. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107840
55. Kelly D., Crosky A., Schoen H., Smollich L. Improving the efficiency of fiber steered composite joints using load path trajectories. *Journal of Composite Materials*. 2006; 40:1645-1658. DOI: 10.1177/0021998306060168
56. Koricho E.G., Khomenko A., Fristedt T., Haq M. Innovative tailored fiber placement technique for enhanced damage resistance in notched composite laminate. *Composite Structures*. 2015; 120:378-385. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.10.016
57. Robinson M.J., Adams T.C. Performance of FRP composite lap joints utilizing fiber tow steering. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 190:107910. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107910
58. Polilov A.N., Tatus N.A., Kamantsev I.S., Kuznetsov A.V., Akhmedshin E.Kh., Tian X. Reducing the effect of holes on the bearing capacity of fiber-reinforced materials. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 2176:030010. DOI: 10.1063/1.5135134
59. Tosh M.W., Kelly D.W. On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000; 31(10):1047-1060. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00063-4
60. Akhmedshin E.Kh., Polilov A.N., Tatus' N.A. Holes manufacturing technology influence on the strength of fibrous composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 747:012096. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012096
61. Schulgasser K., Witztum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems. *Annals of Botany*. 1997; 80:35-44. DOI: 10.1006/anbo.1997.0404
62. Inoue A., Kuraoka K., Kitahara F. Mathematical expression for the relationship between internode number and internode length for bamboo, *Phyllostachys Pubescens*. *Journal of Forestry Research*. 2012; 23(3):435-439. DOI: 10.1007/s11676-012-0281-1
63. Zou M., Xu S., Wei C., Wang H., Liu Z. A bionic methods for the crashworthiness design of thin walled structures inspired by bamboo. *Thin Walled*

Structures. 2016; 101:222-230. DOI: 10.1016/j.tws.2015.12.023

64. Harte A.-M., Fleck A. Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion. *Acta Materialia*. 2000; 48:1259-1271. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00427-9

65. Wegst U.G.K., Ashby M.F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes. *Journal of Materials Science*. 2007; 42:9005-9014. DOI: 10.1007/s10853-007-1936-8

66. Rabotnov Yu.N., Polilov A.N. On the destruction of composite pipes in the form of a Chinese flashlight. *Mechanics of composite materials*. 1983; 3:548-550. (rus.).

67. Plitov I.S., Polilov A.N. Rational dimensions of segments of bamboo stems and composite tubes subjected to compression, flexure and torsion. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015; 44(3):239-248. DOI: 10.3103/S1052618815030176

68. Mattheck C. *Design in nature: learning from trees*. Springer, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-58747-4

69. Eloy C. Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees. *Physical Review Letters*. 2011; 107(25). DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.258101

70. Minamino R., Tateno M. Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models. *PLoS ONE*. 2014; 9(4):9535. DOI: 10.1371/journal.pone.0093535

71. Polilov A.N., Tatus' N.A. Designing branching or shaped composite elements by analogy with the structure of treetops. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017; 46(4):385-393. DOI: 10.3103/S1052618817040124 (rus.).

72. Polilov A.N., Tatus' N.A., Tyan Sh. Profiled and branching analogues of the multi-leaf triangular spring. *Bulletin of PNIPU. Mechanics*. 2018; 4:211-214. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.19 (rus.).

73. Polilov A.N., Tatus' N.A. Design of equal-strength profiled, branched or stratified elastic composite elements. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2018; 5(698):3-12. (rus.).

74. Polilov A.N., Tatus' N.A., Arutjunova A.S., Tian X. Equistrong branchy composite beams with a constant total area of variable elliptic cross sections. *Mechanics of Composite Materials*. 2019; 55(3):325-336. DOI: 10.1007/s11029-019-09815-y (rus.).

75. Polilov A.N., Tatus' N.A., Plitov I.S. Estimating the effect of misorientation of fibers on stiffness and strength of profiled composite elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013; 42(5):390-397. DOI: 10.3103/S1052618813050129 (rus.).

76. Polilov A.N., Tatus' N.A., Tian X. Analyzing the Correctness of Equal Strength Composite Profiled Beam Bending Problems. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019; 60(1):144-155. DOI: 10.1134/S0021894419010188 (rus.).

77. Polilov A.N., Tatus' N.A., Tian X. Analysis of Efficiency of Uniform-Strength Composite Leaf Springs under Various Loading Conditions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019; 48(5):431-439. DOI: 10.3103/S105261881905008X (rus.).

78. Polilov A.N., Tatus' N.A. Features of Composite Beams Bending Analysis by Energy Methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 489:012023. DOI: 10.1088/1757-899X/489/1/012023.

79. Polilov A.N., Tatus' N.A., Zhavyrkin V.V., Tian X. Analysis of efficiency of fiberglass ring and band springs. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020; 49(3):243-255. DOI: 10.3103/S1052618820030097

80. Portnov G.G., Kulakov V.L., Arnautov A.K. Grips for the transmission of tensile loads to a FRP strip. *Mechanics of Composite Materials*. 2013; 49(5):457-474. DOI: 10.1007/s11029-013-9363-1

81. Zhai Zh., Gröschel C., Drummer D. Tensile behavior of quasi-unidirectional glass fiber/polypropylene composites at room and elevated temperatures. *Polymer Testing*. 2016; 54:126-133. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.003

82. Czel G., Jalalvand M., Wisnom M.R. Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016; 91(2):436-447. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.07.021

83. Lee J.-M., Moon J.-S., Shim D., Choi B.-H. Effect of glass fiber distributions on the mechanical and fracture behaviors of injection-molded glass fiber-filled polypropylene with 2-Hole Tension specimens. *Composites Science and Technology*. 2019; 170(1):190-199. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.11.038

84. Zhavyrkin V.V., Polilov A.N., Arutjunova A.S., Tatus' N.A. Correct FRP tensile specimen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 747:012136. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012136

85. Dickson A.N., Barry J.N., McDonnell K.A., Dowling D.P. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2017; 16:146-152. DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.004

86. Li N., Link G., Wang T., Ramopoulos V., Neumaier D., Hofele J. et al. Path-designed 3D printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 182:107612. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107612

87. Brooks H., Molony S. Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement. *Materials and Design*. 2016; 90:276-283. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.123

88. Balla V.M., Kate K.H., Satyavolu J., Singh P., Ganesh J., Tadimetri D. Additive manufacturing of na-

tural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 174:106956. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106956

89. Khan S., Fayazbakhsh K., Fawaz Z., Nik M.A. Curvilinear variable stiffness 3D printing technology for improved open-hole tensile strength. *Additive Manufacturing*. 2018; 24:378-385. DOI: 10.1016/j.adma.2018.10.013

90. Chacón J.M., Caminero M.A., Núñez P.J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J.M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2019; 181:107688. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107688

91. Velasco-Hogan A., Xu J., Meyers M.A. Additive manufacturing as a method to design and optimize bioinspired structures. *Advanced Materials*. 2018; 30:1800940. DOI: 10.1002/adma.201800940

92. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T.-K., Asahara H., Horiguchi K. et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific reports*. 2016; 6:23058. DOI: 10.1038/srep23058

93. Malakhov A., Polilov A., Zhang J., Hou Z., Tian X. A modeling method of continuous fiber paths for additive manufacturing (3D printing) of variable stiffness composite structures. *Applied Composite Materials*. 2020; 27:185-208. DOI: 10.1007/s10443-020-09804-8

94. Wang Q., Tian X., Huang L., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N. Programmable morphing composites with embedded continuous fibers by 4D printing. *Materials & Design*. 2018; 155:404-413. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.027

95. Zhang H., Yang D., Sheng Y. Performance-driven 3D printing of continuous curved carbon fibre reinforced polymer composites: A preliminary numerical study. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 151:256-264. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.06.017

96. Hou Z., Tian X., Zhang J., Zhe L., Zheng Z., Li D. et al. Design and 3D printing of continuous fiber reinforced heterogeneous composites. *Composite Structures*. 2020; 237:111945. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111945

97. Hou Z., Tian X., Zheng Z., Zhang J., Zhe L., Li D. et al. A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 107893. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107893

98. Sugiyama K., Matsuzaki R., Malakhov A.V., Polilov A.N., Ueda M., Todoroki A. et al. 3D Printing of Optimized Composites with Variable Fiber Volume Fraction and Stiffness using Continuous Fiber. *Composites Science and Technology*. 2020; 186:107905. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107905

99. Dell'Anno G., Partridge I., Cartié D., Hamlyn A., Chehura E., James S.W. et al. Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures. *International Journal of Structural Integrity*. 2010; 3(1):22-40. DOI: 10.1108/17579861211209975

100. Misochenko A.A., Prozhega M.V., Salamander K.B., Tatsu N.A., Shokhin A.E. Orbital technological complex (ORTeK) for the production of composite structures in outer space. In the book: *Vostochny Cosmodrome and prospects for the development of Russian cosmonautics*. 2015; 64-65. (rus.).

Received May 31, 2021.

Adopted in revised form on September 23, 2021.

Approved for publication on September 23, 2021.

BIONOTES: Alexander N. Polilov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Head of the Laboratory “Safety and Strength of Composite Structures”; **Blagonravov Institute of Mechanical Engineering Research of RAS**; 4 Small Kharitonsky lane, Moscow, 101000, Russian Federation; SPIN-code: 4392-2715, ID RSCI: 5914, Scopus: 6603583004, ORCID: 0000-0002-0990-5178; polilovan@mail.ru;

Nikolay A. Tatus' — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory “Safety and Strength of Composite Structures”; **Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS**; 4 Small Kharitonsky lane, Moscow, 101000, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2706-2817, ID RSCI: 157336, Scopus: 12039478400, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 574:628.4:625.7/.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1217-1227

Экологические особенности обращения с объектами дорожно-строительного комплекса

Н.И. Шестаков¹, К.Л. Чертес², О.В. Тупицина², В.Н. Пыстин²

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

² *Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Активное развитие транспортной сети автомобильных дорог — одно из направлений строительной деятельности, экологическая безопасность которой не в полной мере соответствует природоохранным требованиям. Дорожно-транспортный комплекс (ДТК) оказывает отрицательное воздействие на все существующие компоненты экосистем, но наибольшее воздействие связано с образованием отходов. Для минимизации отрицательного воздействия обращения с отходами ДТК на компоненты окружающей среды необходимо дополнить известные приемы оценки создаваемых схем и методов подходами, сопряженными с анализом экологической безопасности.

Материалы и методы. В связи с тем, что большинство образующихся при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог отходов являются многокомпонентными, предложена классификация по укрупненным типам в зависимости от их химического состава и состояния.

Результаты. Для численной оценки параметра биопозитивности при сравнительном анализе некоторых технологий опробован метод анализа иерархий, который основан на принципах декомпозиции, парных сравнений и синтеза приоритетов. В общем случае оценка биопозитивности представляет собой иерархическую процедуру, включающую операции, связанные с преобразованием шкалы и ее агрегированием. В качестве критериев, по которым ведется оценка, выбраны наиболее значимые факторы, отражающие влияние данных технологий на окружающую среду.

Выводы. Представленные расчеты параметра биопозитивности для рассматриваемых методов реконструкции автомобильной дороги на заболоченных участках показывают, что наименьшее влияние на окружающую среду оказывает технология выторфовывания. Показатель биопозитивности при выторфовывании в два раза выше, чем при применении геоконтейнерной обработки заболоченных участков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биопозитивность, реконструкция автомобильных дорог, образование отходов, строительные отходы, многокомпонентные отходы, битум, грунт, асфальтобетон, метод анализа иерархий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шестаков Н.И., Чертес К.Л., Тупицина О.В., Пыстин В.Н. Экологические особенности обращения с объектами дорожно-строительного комплекса // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1217–1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1217-1227

Ecological features of handling objects of the road construction complex

Nikolay I. Shestakov¹, Konstantin L. Chertes², Olga V. Tupicyna², Vitaliy N. Pystin²

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

² *Samara State Technical University (SSTU); Samara, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The active development of the transport network of highways is one of the areas of construction activities, the environmental safety of which does not fully comply with environmental requirements. The road transport complex has a negative impact on all existing components of ecosystems, but the greatest impact is associated with the formation of waste generated during the reconstruction of highways. To minimize the negative impact of the road construction complex waste management on environmental components, it is necessary to supplement the well-known methods of assessing the created schemes and methods with approaches associated with the analysis of environmental safety.

Materials and methods. Due to the fact that most of the waste generated during the reconstruction of highways is multi-composite, a classification by enlarged types is proposed, depending on their chemical composition and state of aggregation.

Results. For the numerical assessment of the biopositivity parameter in the comparative analysis of various technologies, the method of hierarchy analysis was tested, which is based on the principles of decomposition, pairwise comparisons and synthesis of priorities. In general, the assessment of biopositivity is a hierarchical procedure that includes operations related to the transformation of the scale and its aggregation. The most significant factors reflecting the impact of the technologies under consideration on the environment were selected as the criteria for the assessment.

Conclusions. The presented calculations of the biopositivity parameter for the considered methods of reconstruction of highways in swampy areas showed that the peat technology has the least impact on the environment. The bio-positivity index during peat extraction is 2 times higher than when using geocontainer processing of wetlands.

KEYWORDS: biopositivity, reconstruction of highways, waste generation, construction waste, multi-composite waste, bitumen, soil, asphalt concrete, hierarchy analysis method

FOR CITATION: Shestakov N.I., Chertes K.L., Tupicina O.V., Pystin V.N. Ecological features of handling objects of the road construction complex. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1217-1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1217-1227 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Качественные автомобильные дороги являются главной составляющей развития транспортной инфраструктуры на территории России. От их безопасности и протяженности напрямую зависят скорость перемещения грузов, обеспечение транспортным сообщением населенных пунктов, а также взаимодействие различных видов транспорта в едином транспортном процессе.

В последнее время объемы дорожных работ в РФ стремительно увеличиваются, в том числе и за счет осуществления различных государственных проектов. Так, в 2017 г. началась реализация приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги», который охватил 36 регионов России, а в 2019 г. в 83 субъектах РФ запущен национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Основным объемом работ, связанных с увеличением общей протяженности автомобильных дорог, относится к капитальному ремонту и ремонту (рис. 1, а), увеличиваются объемы строительства и реконструкции мостов, путепроводов, водопропускных труб, подпорных стенок и шумозащитных сооружений (рис. 1, б).

При внедрении проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» только за 2020 г. общая площадь укладки различных типов дорожных покрытий составила свыше 140 млн м², а земельная площадь, занятая дорогами, дорожными

сооружениями и зданиями, выросла за 3 последних года на 43 % и достигла 1,33 млн га [1, 2].

Среди различных применяемых типов покрытий автомобильных дорог наиболее распространенные — асфальтобетонные. В качестве основных компонентов асфальтобетонных смесей, помимо минеральных заполнителей и битума, используются модифицирующие многокомпонентные добавки различного генезиса. Например, добавки на основе блок-сополимера бутадиена и стирола увеличивают температурный диапазон эксплуатации асфальтобетонных покрытий, стабилизирующие добавки на основе целлюлозы или хризотил-асбеста контролируют процессы стекания вяжущего при транспортировке и укладке щебеночно-мастичных асфальтобетонов [3]. Объем различных типов покрытий, уложенных на территории России в 2020 г., представлен в табл. 1.

Прогресс дорожно-строительного комплекса (ДТК) сказывается на увеличении потребности в дорожно-строительных материалах и, как следствие, количества образования отходов. Обеспечение устойчивого развития ДТК вызывает необходимость повышения экологических требований к сети автомобильных дорог [4–6]. Экологический подход служит исходной позицией при таком развитии и базируется на рациональном применении природных и энергетических ресурсов с образованием минимального количества образующихся отходов и выбросов.

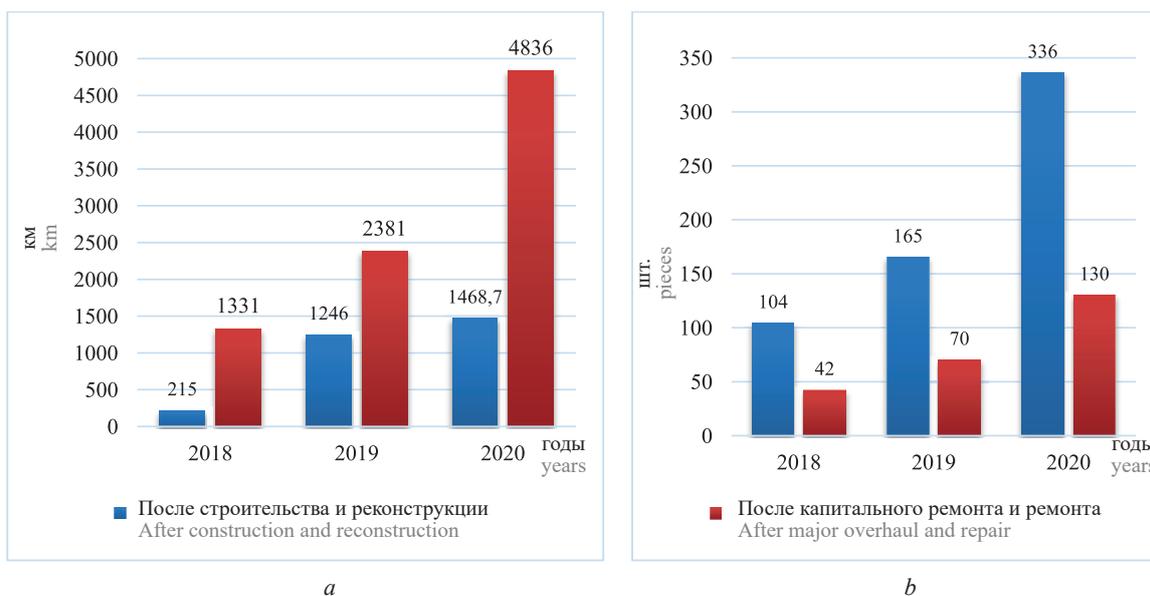


Рис. 1. Динамика роста количества принятых в эксплуатацию объектов дорожно-транспортного комплекса: а — автомобильные дороги; б — мосты и путепроводы

Fig. 1. Growth dynamics of the number of road transport facilities put into operation: a — highways; b — bridges and overpasses

Табл. 1. Количество различных типов покрытий автомобильных дорог общего пользования, уложенных за 2020 г.

Table 1. The number of different types of road surfaces for public roads installed in 2020

Тип покрытия Cover type	Объемы при строительстве и реконструкции, км Volumes during construction and reconstruction, km	Объемы после капитального ремонта и ремонта, км Volumes after major overhaul and repair, km
Асфальтобетонные Asphalt concrete	1149,4	4072,5
Цементобетонные Cement concrete	3,0	12,9
Из щебня и гравия, обработанных вяжущими материалами From crushed stone and gravel treated with binders	3,9	21,7
Из щебня и гравия, не обработанных вяжущими материалами From crushed stone and gravel, not treated with binders	312,4	702,6
Из грунтов и местных малопрочных материалов, обработанных вяжущими материалами From soils and local low-strength materials treated with binders	—	26,5

По приведенным данным (табл. 2) из Приказа Министра России от 16.01.2020 № 15/пр «Об утверждении Методики по разработке и применению нормативов трудноустраняемых потерь и отходов материалов в строительстве» и ГЭСН 81-02-27-2017 «Государственные сметные нормативы. Государственные элементные сметные нормы на строительные и специальные строительные работы. Сборник 27. Автомобильные дороги» выявлено, что основной массив отходов относится к минеральной и органоминеральной группе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе эксплуатации автомобильные дороги и дорожно-транспортные сооружения подвергаются длительному и многократному воздействию от движущихся автомобилей и природно-климатических факторов. Под действием таких комплексных нагрузок в автомобильной дороге накапливаются остаточные деформации, которые в дальнейшем приводят к разрушению ее покрытия и дорожных сооружений. При постепенном нарастании нагрузок происходит разрушение автомобильной дороги до предельного состояния, при котором стандартные мероприятия по содержанию и ремонту уже не обеспечивают выполнение требований к характеристикам дороги, и возникает необходимость ее реконструкции [7, 8].

Реконструкция автомобильной дороги способствует значительному улучшению геометрических параметров дороги, прочностных, эксплуатационных и других характеристик дорожной одежды, искусственных сооружений, инженерного оборудования и элементов обустройства.

Состав работ и технологических процессов, проводимых при реконструкции, зависит от многих

факторов, общие работы можно представить в виде блок-схемы, разделив ее на подготовительный, основной и заключительные этапы (рис. 2).

В процессе проектирования реконструкции автомобильной дороги стараются максимально применять образовавшиеся материалы [9], но такая возможность существует лишь при соответствии качества материалов требованиям проекта. При работе с дорожной одеждой в большом количестве образуются асфальтобетонный гранулят, сфрезерованный бетон, щебень и песок из нижних слоев, а также полимерные материалы из дренирующих, армирующих, морозозащитных слоев. Реконструкция связана с землеотводом, вследствие чего осуществляется изъятие или отчуждение земельных участков, необходимых для размещения как самой автодороги, так и ее конструктивных элементов и элементов инфраструктуры. При интенсивном транспортном потоке на расстоянии до 30–50 м от бровки земляного полотна происходит загрязнение почвы выше допустимых пределов транспортными выбросами, которые содержат свинец, цинк, медь, нитраты, а также хлориды. Эту загрязненную почву складывают отдельно и затем используют в нижних слоях конструкции дорожной одежды, при засыпке оврагов или благоустройстве площадок [10–12].

Состав отходов может существенно отличаться при одинаковых видах выполняемых работ, что значительно усложняет подходы к созданию эффективной системы их утилизации [13]. Основной массив отходов включает битумы, как наиболее распространенное вяжущее для большинства дорожных работ, однако тенденция развития дорожной отрасли стабильно увеличивает объемы применения полимерных материалов. Отходы, образующиеся при дорожно-строительных работах, в большинстве своем являются многокомпонентными или комплексными.

Табл. 2. Нормативы потерь и отходов материалов в процессе дорожно-строительного производства¹Table 2. Norms of losses and waste of materials in the process of road construction production¹

Типы отходов Waste types	Нормативы потерь и отходов, % Losses and waste standards, %	Количество материала на 1000 м ² покрытия, т Amount of material per 1,000 m ² of coating, t	Допустимое количество отходов на 1000 м ² покрытия, т Allowable amount of waste per 1,000 m ² of coating, t
<i>1. Органические</i> <i>1. Organic</i>			
Мастики битумосодержащие и битумы Bituminous mastics and bitumen	3	0,14	0,0042
Вяжущие полимерно-битумные Polymer-bitumen binders	3	0,128	0,00384
Краски, лаки, масла Paints, varnishes, oils	3	0,073	0,00219
<i>2. Минеральные</i> <i>2. Mineral</i>			
Щебень, гравий при устройстве щебеночной подготовки Crushed stone, gravel when arranging crushed stone preparation	4,5	335	15,1
Камни бутовые Rubble stones	5	385	19,3
Бетон монолитный (слой 20 см) Monolithic concrete (layer 20 cm)	1,5	482	7,3
<i>3. Органоминеральные</i> <i>3. Organomineral</i>			
Смеси асфальтобетонные (слой 5 см) Asphalt concrete mixtures (layer 5 cm)	2	125	2,5
Щебень, обработанный битумом Crushed stone treated with bitumen	2,5	145	3,6
Грунт, укрепленный битумной эмульсией (слой 20 см) Soil reinforced with bitumen emulsion (20 cm layer)	2	420	8,4

Классификацию отходов можно представить по многим признакам, но наиболее важным критерием служит состав материалов, так как от него напрямую зависит подход к дальнейшей переработке и утилизации образовавшихся отходов (табл. 3).

При обращении с отходами применяется совокупность методов, которая способствует увеличению степени переработки, обезвреживания и дальнейшего использования отходов [14]. Основное направление в процессе работы с отходами ДТК — это переработка материалов с последующей возможностью применения в качестве альтернативы природным горным породам. Существующие методы обращения с отходами можно представить как последовательный набор технологических этапов, выбор которых зависит от состава и назначения перерабатываемой группы отходов. Первый этап —

накопление и сортировка отходов по обобщенным признакам, таким как химический или вещественный состав, размеры, агрегатное состояние и т.д. Далее чаще всего в технологических линиях проходит этап измельчения с применением дробильного или помольного оборудования, после чего следует сепарация или разделение на фракционные составляющие получившегося массива отходов. Для отходов, содержащих органические материалы, дальнейшая переработка связана с воздействием повышенных температур и приводит к перераспределению или пластификации.

Однако данные методы и их технологические цепочки пригодны исключительно для однокомпонентного отхода и затруднены для отходов многокомпонентных.

Существующие экологические подходы к объектам дорожно-транспортного строительства и приемы обращения с отходами не позволяют осуществлять

¹ ГОСТ Р 57678-2017. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Ликвидация строительных отходов.



Рис. 2. Блок-схема поэтапных работ при реконструкции автомобильной дороги

Fig. 2. Block diagram of stage-by-stage works during the reconstruction of the highway

Табл. 3. Классификация отходов, образующихся при реконструкции автомобильной дороги

Table 3. Classification of waste generated during the reconstruction of the road

Тип отходов Waste type	Наименование отхода Waste name	Агрегатное состояние и физическая форма Physical state and physical form
<i>1. Грунто-органические</i> <i>1. Soil-organic</i>		
Грунто-полимерные Soil-polymer	Отходы грунта с геотекстилем Waste soil with geotextile	Сыпучие материалы Bulk materials
	Отходы грунта с георешетками Waste soil with geogrids	Сыпучие материалы Bulk materials
	Отходы грунтовых геоболочек Waste of soil geosheaths	Сыпучие материалы Bulk materials
	Отходы грунта, укрепленного полимерными стабилизаторами Waste soil reinforced with polymer stabilizers	Смесь твердых материалов Mix of solid materials
Грунто-битумные Soil-bituminous	Отходы грунта, загрязненного битумом Waste soil contaminated with bitumen	Сыпучие материалы Bulk materials
	Отходы грунта, загрязненного битумной эмульсией Waste soil contaminated with bitumen emulsion	Сыпучие материалы Bulk materials
<i>2. Армо-минеральные</i> <i>2. Armo-mineral</i>		
Конгломератной структуры Conglomerate structure	Лом бетонных изделий, отходы бетона в кусковой форме Scrap of concrete products, concrete waste in lump form	Кусковая форма Lump shape
	Лом железобетонных изделий, отходы железобетона в кусковой форме Scrap of reinforced concrete products, waste of reinforced concrete in lump form	Кусковая форма Lump shape

Тип отходов Waste type	Наименование отхода Waste name	Агрегатное состояние и физическая форма Physical state and physical form
Рыхло-зернистой структуры Loose-grained structure	Лом дорожного полотна автомобильных дорог (кроме отходов битума и асфальтовых покрытий) Scrap of the roadbed of highways (except for waste bitumen and asphalt pavements)	Смесь твердых материалов Mix of solid materials
	Отходы габионов Waste gabions	Смесь твердых материалов Mix of solid materials
<i>3. Минерально-битумные 3. Mineral-bituminous</i>		
Битумосодержащие минеральные отходы Bituminous mineral waste	Лом асфальтобетонных покрытий Scrap of asphalt concrete pavements	Смесь твердых материалов Mix of solid materials
	Лом щебеночно-мастичных асфальтобетонных покрытий Scrap of crushed stone-mastic asphalt-concrete pavements	Смесь твердых материалов (включая волокна) Blend of solid materials (including fibers)
	Отходы мокрой газоочистки при производстве битуминозных смесей Waste from wet gas cleaning in the production of bituminous mixtures	Дисперсные системы Disperse systems
	Отходы асфальтобетона и/или асфальтобетонной смеси в виде пыли Waste asphalt concrete and/or asphalt concrete mixture in the form of dust	Пыль Dust
	Отходы щебня, обработанного битумом в производстве асфальта Waste of crushed stone treated with bitumen in the production of asphalt	Твердое Solid
<i>4. Синтетические 4. Synthetic</i>		
Монополимерные Monopolymer	Отходы битума нефтяного Waste petroleum bitumen	Кусковая форма Lump shape
	Отходы геоплит Waste geoplit	Твердое Solid
	Отходы геомембран Waste geomembranes	Полотна Canvases
	Отходы модифицирующих добавок для битума Waste modifying additives for bitumen	Жидкое Liquid
Композитные полимерные Composite polymer	Эмульгаторы для катионных битумных эмульсий на основе алкиламинэтоксилата, утратившие потребительские свойства Emulsifiers for cationic bitumen emulsions based on alkylamine ethoxylate that have lost their consumer properties	Жидкое Liquid
	Отходы битумной пропитки для упрочнения асфальтобетонного покрытия Waste bitumen impregnation for hardening asphalt concrete pavement	Жидкое в жидком, эмульсия Liquid in liquid, emulsion

дорожные работы с минимальным воздействием на компоненты экосистем.

Выходом из создавшейся ситуации выступает создание комплексной системы оценки состояния

и экологической безопасности дорожно-транспортного строительства с использованием многокомпонентных материалов, производство которых основано на биопозитивных технологиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биопозитивные технологии можно рассматривать как совокупность параметров технологии, направленной на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, состоящую из рациональных и эффективных технологий обезвреживания и переработки материалов, с минимальными выбросами в окружающую среду, производимыми выделениями, использованием ограниченного пространства и энергии, а также образованием побочных продуктов либо без них [15].

Определение численного параметра биопозитивности возможно при сравнительном анализе подобных технологий по ряду известных критериев или параметров, которые можно представить как аналитические иерархические модели. Наиболее эффективным алгоритмом их решения является метод анализа иерархий (МАИ), который заключается в декомпозиции проблемы на более простые составляющие и дальнейшей обработке по парным сравнениям. Эффективность и востребованность данного метода подтверждается широким применением его как зарубежными, так и отечественными учеными от управления на межгосударственном уровне до решения отраслевых и частных проблем в любой отрасли. В основе метода анализа иерархий лежат три принципа: декомпозиции, парных сравнений и синтеза приоритетов.

Выявление показателя биопозитивности начинается с построения иерархической структуры, которая включает цель (итоговый показатель биопозитивности), критерии (по которым определяется биопозитивность) и альтернативы (предметы сравнительного анализа). Для решения задачи во внимание принимаются разные количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки. С помощью процедуры их парных сравнений МАИ позволяет определить приоритеты достижения цели и построить матрицы сравнений. Затем выполняются анализ этой матрицы и полилинейная свертка

всех приоритетов иерархии, рассчитываются приоритеты альтернатив относительно главной цели, а лучшей считается альтернатива с максимальным значением приоритета.

Оценка биопозитивности для технологий проводится по критериям, указанным в табл. 4.

Рассмотрим сравнение показателей биопозитивности при работе с возведением земляного полотна на болотах или слабых основаниях при реконструкции автомобильной дороги на примере двух технологий: выторфовывание и геоконтейнерная обработка заболоченных участков.

Выторфовывание производится при сооружении насыпи на слабых грунтах, в том числе болотных, без их удаления с целью снижения неравномерности ее осадки путем устройства в основании насыпи обоймы или платформы из армирующих и дренирующих геоматериалов: тканых и нетканых геотекстилей, плоских геосеток в комбинации с объемными геоматериалами. Основа метода заключается в выдавливании торфа собственным весом насыпи. После рыхления торфа устраивают специальные торфоприемники (траншеи вдоль подошвы насыпи), отсыпают насыпь узким фронтом, затем осуществляют воздействие виброударной и ударной нагрузкой.

Геоконтейнерная обработка заболоченного грунта [16] позволяет проводить комплексную обработку по обезвоживанию и стабилизации с последующей очисткой фильтрата за счет последовательного нагнетания и выдерживания в оболочках на основе тканых полимерных материалов однослойной проводимости [17].

Первый этап — иерархическое воспроизведение проблемы, где вершиной иерархии является показатель биопозитивности (общая цель проблемы), а уровнями приоритетных параметров — составляющие критерии, которые указаны в табл. 4. В качестве уровня альтернатив рассматривается выторфовывание и геоконтейнерная обработка заболоченных участков.

Табл. 4. Критерии биопозитивности

Table 4. Bio-positivity criteria

Обозначение критерия Criterion designation	Описание критерия Description of the criterion	Обозначение критерия Criterion designation	Описание критерия Description of the criterion
K1	Выбросы в атмосферу Air emissions	K5	Потребление электроэнергии Electricity consumption
K2	Сбросы в воду Discharges to water	K6	Занимаемое пространство Occupied space
K3	Образование отходов Waste generation	K7	Выделение тепловой энергии Heat release
K4	Использование природных ресурсов Use of natural resources	K8	Вибрационное и шумовое воздействие Vibration and noise impact

Табл. 5. Численная шкала относительной важности

Table 5. Numerical scale of relative importance

Интенсивность относительной важности Intensity of relative importance	Определение Definition
0	Варианты не сравнимы The options are not comparable
1	Равная важность Equal importance
3	Умеренное превосходство одного над другим Moderate superiority of one over the other
5	Существенное или сильное превосходство Substantial or strong superiority
2,4	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями Intermediate solutions between two adjacent judgments

Табл. 6. Матрица парных сравнений относительно показателя биопозитивности

Table 6. Matrix of paired comparisons in relation to the biopositivity index

Критерий Criterion	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Вектор матрицы Matrix vector	Приоритет (вес критерия) A priority (criterion weight)
K1	1	1	1/3	1/3	3	3	3	3	1,316	0,136
K2	1	1	1/3	1/3	3	3	3	3	1,316	0,136
K3	3	3	1	1	3	3	3	3	2,280	0,236
K4	3	3	1	1	5	3	3	3	2,430	0,251
K5	1/3	1/3	1/3	1/5	1	3	1	1	0,621	0,064
K6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	0,382	0,040
K7	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3	1	1	0,662	0,068
K8	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3	1	1	0,662	0,068
Σ	9,33	9,33	4,00	3,87	17,33	22,00	15,33	15,33	9,670	1,000
Индекс согласованности Consistency index									0,07705	
Отношение согласованности (при CC = 1,41) Consistency ratio (with CC = 1.41)									5,46 %	

Табл. 7. Результаты расчета матрицы парных сравнений альтернатив и глобальных приоритетов

Table 7. Results of calculating the matrix of paired comparisons of alternatives and global priorities

Критерий Criterion	Вес критерия Criterion weight	Выторфовывание Peat	Геоконтейнерная обработка Geocontainer handling
K1 — Выбросы в атмосферу K1 — Emissions to the atmosphere	0,136	0,25	0,75
K2 — Сбросы в воду K2 — Discharges to water	0,136	0,16	0,84
K3 — Образование отходов K3 — Waste generation	0,236	0,50	0,50
K4 — Использование природных ресурсов K4 — Use of natural resources	0,251	0,25	0,75
K5 — Потребление электроэнергии K5 — Electricity consumption	0,064	0,25	0,75
K6 — Занимаемое пространство K6 — Occupied space	0,040	0,16	0,84
K7 — Выделение тепловой энергии K7 — Release of thermal energy	0,068	0,25	0,75
K8 — Вибрационное и шумовое воздействие K8 — Vibration and noise impact	0,068	0,84	0,16

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Критерий Criterion	Вес критерия Criterion weight	Выторфовывание Peat	Геоконтейнерная обработка Geocontainer handling
Глобальный показатель Global indicator		0,333	0,667
Показатель биопозитивности Bio-positivity indicator		3,0	1,5

Далее всем выбранным критериям должна быть присвоена оценка по шкале относительной важности (табл. 5) [18, 19], а полученные результаты заносятся в матрицу парных сравнений (табл. 6).

После установления собственных весов каждого из критериев биопозитивности проводится попарное сравнение двух вариантов возведения земляного полотна на заболоченных участках отдельно по каждому из критериев (табл. 7) [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя результаты приведенных расчетов, можно сделать вывод, что максимальное

значение глобального приоритета, равное 0,667, получено для метода геоконтейнерной обработки заболоченного грунта, однако так как величина биопозитивности отображает значения минимального негативного воздействия на природную среду при минимальных ресурсах, то она должна быть обратно пропорциональна рассчитанному глобальному воздействию. Таким образом, показатель биопозитивности для технологии выторфовывания заболоченного грунта в два раза превышает рассматриваемый альтернативный метод, и решение о его выделении наиболее рационально отвечает экологическим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажлуни А.М., Шарыгина О.Л. Национальные проекты России и их реализация // Вестник аграрной науки. 2019. № 6 (81). С. 72–76. DOI: 10.15217/issn2587-666X.2019.6.72
2. Прилуцкая В.А. Проблемы экологии при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2017. № 4. С. 27.
3. Фаткуллина А.В. К некоторым вопросам экологии на автомобильных дорогах // Вести Автомобильно-дорожного института. 2013. № 1 (16). С. 172–177.
4. Nie J., Wang J., Gou S., Zhu Y., Fan J. Technological development and engineering applications of novel steel-concrete composite structures // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s11709-019-0514-x
5. Kasharin D.V. Using biopositive constructions made of composite materials in water and electricity supply for recreational facilities // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076275
6. Mohamed Ahmad F.H., Jamal M.H., Mohd Sam A.R. Green technology and sustainable urban drainage systems using eco-composite porous concrete: A preliminary study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 220. P. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/220/1/012039
7. Козачек А.В., Беляева Н.П. Теория и практика нормативного расчета величин загрязнения окружающей среды на автомобильном транспорте и транспортных предприятиях. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2015. 80 с.
8. Жуков В.И., Горбунова Л.Н., Севастьянов С.А. Оценка воздействия транспортно-дорожного комплекса на окружающую среду. Красноярск : СФУ, 2012. 21 с.
9. Шукуров М.М., Нурдинов М.А., Солиев Б.А., Исмоилов Р.И. Дорожно-транспортный комплекс, и их воздействие на окружающую среду // Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. 2021. № 4. С. 689–696.
10. Чижиков И.А. Применение биопозитивных конструкций и технологии при строительстве грунтовых сооружений в сложных гидрогеологических условиях // Вестник евразийской науки. 2012. № 4 (13). С. 107.
11. Бойко Н.И., Кораблев Р.А., Бусарин Э.Н., Разгоняева В.В. Методы оценки взаимодействия автомобильных дорог с окружающей средой // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2011. № 14. С. 128–130.
12. Кныш В.А., Ларичкин Ф.Д., Невская М.А., Федосеев С.В., Блошенко Т.А., Мелик-Гайказов Т.А. и др. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий: монография. Апатиты : Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 252 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.417.4
13. Раменская Л.А. Применение концепции экосистем в экономико-управленческих исследованиях // Управленец. 2020. Т. 11. № 4. С. 16–28. DOI: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-2
14. Рыбак В.А., Шокар А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки

принятия решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 3. С. 12–18.

15. Чертес К.Л., Шестаков Н.И. Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1135–1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146

16. Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н. Геоэкологическая оценка накопителей шламов водного хозяйства и разработка технологий их ликвидации // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 110–129. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.110-129

17. Чертес К.Л., Тупицына О.В., Сафонова Н.А., Пыстин В.Н., Назаров М.В., Ярыгина А.А. Геоконтейнерная обработка буровых шламов // За-

щита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 3. С. 36–39.

18. Федосеев В.Н., Зайцева И.А. Информационно-аналитический подход к решению сложных слабоструктурированных задач методом анализа иерархий (МАИ) // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений: сб. науч. тр. 2019. С. 72–82.

19. Рязанцев В.И., Морозов А.В. Методика проведения согласования экспертных оценок, полученных путем индивидуального анкетирования методом анализа иерархий // Инженерный вестник. 2014. № 12. С. 19.

20. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108009

Поступила в редакцию 5 августа 2021 г

Принята в доработанном виде 10 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 10 сентября 2021 г.

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

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

Ольга Владимировна Тупицына — доктор технических наук, профессор, доцент, заведующая кафедрой химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; Olgatupicyna@yandex.ru;

Виталий Николаевич Пыстин — кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; Vitaliy.pystin@yandex.ru.

REFERENCES

1. Azhluni A.M., Sharygina O.L. National projects of Russia and their financing. *Bulletin of Agrarian Science*. 2019; 6(81):72-76. DOI: 10.15217/issn2587-666X.2019.6.72 (rus.).

2. Prilutskaya V.A. Environmental problems during the construction and operation of highways. *International Journal of Applied Science and Technology Integral*. 2017; 4:27. (rus.).

3. Fatkulina A.V. Concerning some ecological problems on highways. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2013; 1(16):172-177. (rus.).

4. Nie J., Wang J., Gou S., Zhu Y., Fan J. Technological development and engineering applications of novel steel-concrete composite structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2019; 13(1):1-14. DOI: 10.1007/s11709-019-0514-x

5. Kasharin D.V. Using biopositive constructions made of composite materials in water and electricity

supply for recreational facilities. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076275

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

7. Kozachek A.V., Belyaeva N.P. *Theory and practice of normative calculation of the values of environmental pollution in road transport and transport enterprises*. Tambov, Tambov State Technical University, 2015; 80. (rus.).

8. Gorbunova L.N., Sevast'yanov S.V., Zhukov V.I. *Assessment of the impact of the transport and road complex on the environment*. Krasnoyarsk, SFU, 2012; 794. (rus.).

9. Shukurov M.M., Nurdinov M.A., Soliev B.A., Ismoilov R.I. Road and transportation complex and their impact on the environment. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. 2021; 4:689-696. (rus.).
10. Chizhikov I.A. Using biopositveconstructions and processes in construction of soil structures under complex hydrogeological conditions. *Bulletin of Eurasian Science*. 2012; 4(13):1-61. (rus.).
11. Boyko N.I., Korablev R.A., Busarin E.N., Razgonyaeva V.V. Methods for assessing the interaction of highways with the environment. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. 2011; 14:128-130. (rus.).
12. Knysh V.A., Larichkin F.D., Nevskaya M.A., Fedoseev S.V., Bloshenko T.A., Melik-Gaikazov T.A. et al. *Rational use of secondary mineral resources in conditions of greening and implementation of the best available technologies: monograph*. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019; 252. DOI: 10.37614/978.5.91137.417.4 (rus.).
13. Ramenskaya L.A. The concept of ecosystem in economic and management studies. *Manager*. 2020; 11(4):16-28. DOI: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-2 (rus.).
14. Rybak V.A., Shokr A. Analysis and comparison of existing decision support technology. *System Analysis and Applied Informatics*. 2016; 3:12-18. (rus.).
15. Chertes K.L., Shestakov N.I. Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1135-1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146 (rus.).
16. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Pystin V.N. Geoecological Evaluation of Water Industry Sludge Ponds and Developing the Techniques of their Disposal. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 2:110-129. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.110-129 (rus.).
17. Chertes K., Tupitsina O., Safonova N., Pystin V., Nazarov M., Yaryghina A. Geocontainer treatment of drilling cuttings. *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*. 2014; 3:36-39. (rus.).
18. Fedoseev V.N., Zaitseva I.A. Examination of object-spatial modeling of air heat pump method of analysis of hierarchies. *Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions: a collection of scientific papers*. 2019; 72-82. (rus.).
19. Ryazantsev V.I., Morozov A.V. Methodology for the coordination of expert assessments obtained by individual questionnaires using the method of analysis of hierarchies. *Engineering Bulletin*. 2014; 12:1-9. (rus.).
20. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:08009. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199108009

Received August 5, 2021.

Adopted in revised form on September 10, 2021.

Approved for publication on September 10, 2021.

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

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

Olga V. Tupicyna — Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RISC: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; Olgatupicyna@yandex.ru;

Vitaliy N. Pystin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RISC: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; Vitaliy.pystin@yandex.ru.

Оценка влияния климатических характеристик и ландшафтных изменений на максимальный сток малых водосборов

В.В. Ильинич, А.В. Перминов, А.А. Наумова

*Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены вопросы безопасности гидротехнических сооружений на малых водосборах. Исследование заключается в разработке методики оценки влияния климатических и ландшафтных изменений на максимальный поток, определяющий размеры элементов конструкции. Практическая значимость обусловлена оценкой изменения надежности гидротехнических сооружений, а также степени потенциального затопления территорий и эрозии почвы при дождевых паводках. С научной точки зрения практическая значимость состоит в обосновании изменения параметров формулы расчета максимального расхода. Основная цель работы — проверка гипотез об увеличении интенсивности ливневых дождей и характеристик ландшафта в последние десятилетия. Решены следующие задачи: оценка увеличения суточных максимумов осадков и преобразований ландшафта за последние десятилетия, а также оценка степени влияния этих факторов на увеличение максимума расходов воды.

Материалы и методы. Использованы данные сетевой метеостанции и ландшафтные характеристики водосбора. Применены методы статистического анализа и геоинформационных технологий.

Результаты. Ключевыми результатами исследования стали характеристики увеличения максимальных суточных осадков и изменений ландшафта за последние десятилетия и характеристики их влияния на увеличение максимального расхода воды, полученные на основе теории вероятностей и теории поверхностного стока.

Выводы. Подтверждена эффективность предложенной методики оценки изменений климатических и ландшафтных характеристик водосборов и их влияния на максимальные пики паводков. Гидротехнические сооружения, построенные как во второй половине XX в. на небольших водосборах, так и в последующие годы при использовании существующих строительных норм и правил, не прошедших должного обновления, утратили свою первоначальную надежность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, малый водосбор, гидротехнические сооружения, максимальные осадки, ландшафтные характеристики

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильинич В.В., Перминов А.В., Наумова А.А. Оценка влияния климатических характеристик и ландшафтных изменений на максимальный сток малых водосборов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1228–1235. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1228-1235

Assessment of the impact of climatic characteristics and landscape changes on the maximum flow of small watersheds

Vitaly V. Ilinich, Aleksey V. Perminov, Anna A. Naumova

*Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The article dedicated to safety of hydraulic structures in small catchments. The research consists in the development of a methodology for assessment of influence of climatic and landscape changes on the maximum flow which determines sizes for the construction elements. The practical significance is due to the assessment of changes in the reliability of hydraulic structures, as well as the degree of potential flooding of territories and soil erosion during rain floods. In scientific terms, the practical significance lies in the justification of changes in the parameters of the formula for the maximum flow calculating. The main goal of the study was to test hypotheses about an increase in the intensity of storm rainfalls and of changes in landscape characteristics during recent decades. Accordingly the next problems were decided: assessment the increase in the daily maximums of precipitation and landscape changes over the past decades; as well as assessing the degree of influence of the above factors on the increase in the maximum water.

Materials and methods. The data of the network weather station and the landscape characteristics of the catchment area served as the research materials. Methods of statistical analysis and geoinformation technologies were used as research methods.

Results. The main results of the research were the characteristics of the increase in maximum daily precipitation and landscape changes over the past decades and the characteristics of their influence on the increase in maximum water flow, obtained on the base of probability theory and of the surface flow theory.

Conclusions. A confirmation of the effectiveness of the proposed methodology for assessing changes in the climatic and landscape characteristics of catchments and their impact on the flood maximums. The hydraulic structures built both in the second half of the twentieth century on small catchments, and in subsequent years when using existing building regulations that do not have proper updating have lost their original reliability.

KEYWORDS: climate change, small catchment area, hydraulic structures, maximum precipitation, landscape characteristics

FOR CITATION: Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Assessment of the impact of climatic characteristics and landscape changes on the maximum flow of small watersheds. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1228-1235. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1228-1235 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные исследования в течение последних десятилетий [1–5] констатируют, что во многих регионах мира и, в частности, в российских [6–11], имеется тенденция роста интенсивности ливневых дождевых осадков, что приводит к повышению нормативных максимальных расходов воды, на которые рассчитываются гидротехнические сооружения.

В большей степени это явление связывают с повышением температуры воздуха [5, 9], поскольку теплый воздух потенциально может содержать больше водяных паров, которые затем могут проявиться в ливневых осадках. Однако другие причины также вероятны, например, увеличение аэрозолей в воздухе, как ядер конденсации, вследствие урбанизации и изменения в целом атмосферных процессов из-за потепления климата [5, 10, 11].

Повышение максимальных дождевых расходов проявляется на малых водосборах, в первую очередь, ввиду малого времени добегающего дождевых вод к замыкающему створу речного бассейна. Здесь уместно отметить, что, начиная с южной части Нечерноземной зоны и южнее, практически без исключения максимальные расходы дождевых паводков на малых водосборах (до 200 км²) значительно превышают максимальные расходы весенних половодий, и именно они определяют многие параметры гидротехнических сооружений на малых реках, балках и противозерозионных устройствах на севооборотах. Изменение максимальных расходов может также происходить из-за преобразования ландшафта при урбанизации территории и др. [12–14]. Спутниковая информация и геоинформационные системы (ГИС) имеют достаточную возможность отражать ландшафтные перемены водосборов во времени. Соответственно, представленные факторы вероятных изменений максимальных расходов воды на малых реках учитываются или должны быть учтены в различного рода моделях штормовых осадков и максимального дождевого стока^{1,2} [14–16].

Принимая во внимание вышеизложенное, в настоящем исследовании основной цели была поставлена проверка гипотез относительно конкретного малого водосбора: о повышении интенсивности ливневых осадков в последние десятилетия и изменении ландшафтных характеристик; возможно-

сти оценки влияния этих процессов на расчетные максимальные расходы воды для гидротехнических сооружений.

Решались следующие задачи:

- оценка увеличения максимального количества осадков за последние десятилетия относительно конкретного малого речного бассейна;
- определение изменений его ландшафта за последние десятилетия с использованием ГИС;
- оценка степени влияния приведенных факторов на увеличение расчетных максимальных расходов воды для гидротехнических сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования принят водосбор малой р. Локна (длина $L = 21$ км, площадь речного бассейна $F = 178$ км²) в Тульской области, климат территории которой умеренно-континентальный, и летние ливневые дожди могут вызывать как атмосферные фронты, так и в отдельных случаях — внутримассовую облачность. Исследуемая река протекает в районе г. Плавска, где имеется сетевая метеорологическая станция, производящая полноценные измерения за осадками. Пределы г. Плавска постоянно расширяются, и урбанизация исследуемого речного бассейна увеличивается. Для выбранной территории есть как старые, так и современные необходимые картографические материалы. Данные наблюдений за осадками были взяты с открытого сайта³, который содержит среднесуточные значения температуры и осадков с 1963 г. по сегодняшний день. Для изучения использовались проверенные временные ряды суточных осадков за период 1963–2015 гг. Хронологический график годовых максимумов суточных осадков (мм) представлен на рис. 1, где очевидно существенное увеличение их значений со временем.

Имеется еще одно доказательство увеличения максимальных суточных осадков с точки зрения эмпирической вероятности, которая была рассчитана с применением традиционной формулы Вейбулла [17, 18] относительно двух равных периодов (период 1 — с 1963 по 1991 гг. и период 2 — с 1992 по 2020 гг.):

$$P = \frac{m}{n+1} 100 \%, \quad (1)$$

где m — номер в ряду убывающих значений осадков; n — количество наблюдений за каждый период (29 лет).

¹ Система гидрологического моделирования HEC-HMS. Техническое справочное руководство. 2000. URL: [http://ponce.sdsu.edu/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://ponce.sdsu.edu/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)

² МАЙК 11 — Система моделирования рек и каналов. Справочное руководство. 2008.

³ URL: meteo.ru

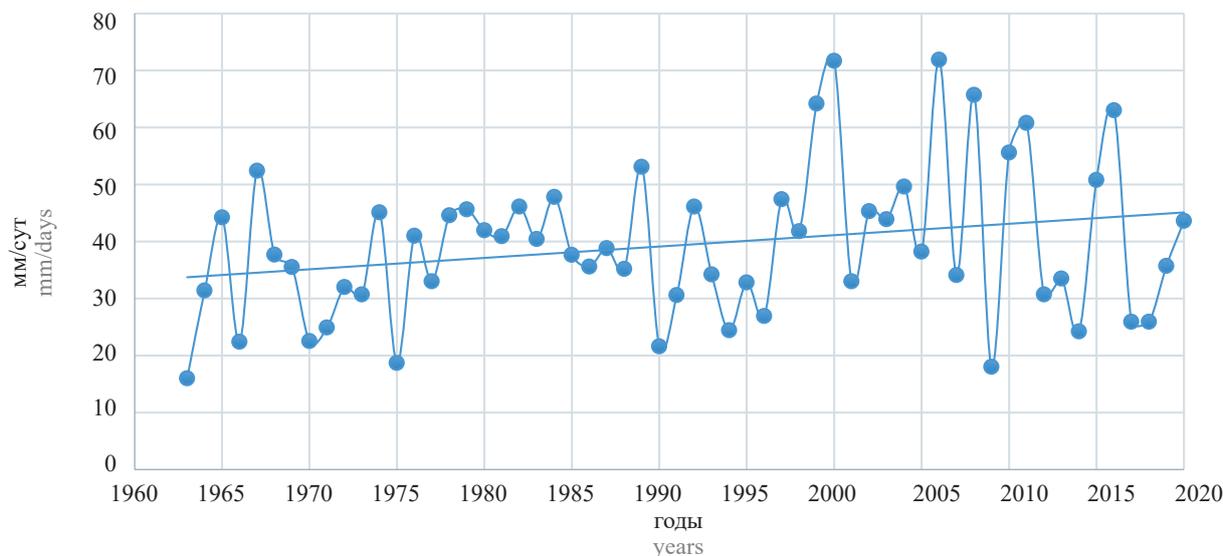


Рис. 1. Хронологический график годовых максимумов суточных осадков

Fig. 1. A chronological chart of the annual maximum daily precipitation

Графическое отображение в точках эмпирической вероятности представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что почти все точки одноименной обеспеченности второго ряда расположены выше, чем точки первого ряда.

Согласно российским нормативным документам⁴, проектирование гидротехнических объектов на малых водосборах и оценка возможного

затопления территории требуют определения максимальных расходов воды в зависимости от соответствующих значений максимальных суточных осадков одноименной нормативной обеспеченности. В табл. приведено сопоставление результатов статистической оценки годовых максимумов суточных осадков относительно средних значений и значений 1%-го квантиля вероятности превышения согласно рекомендованному в России трехпараметрическому распределению С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [18]. Параметры были определены

⁴ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

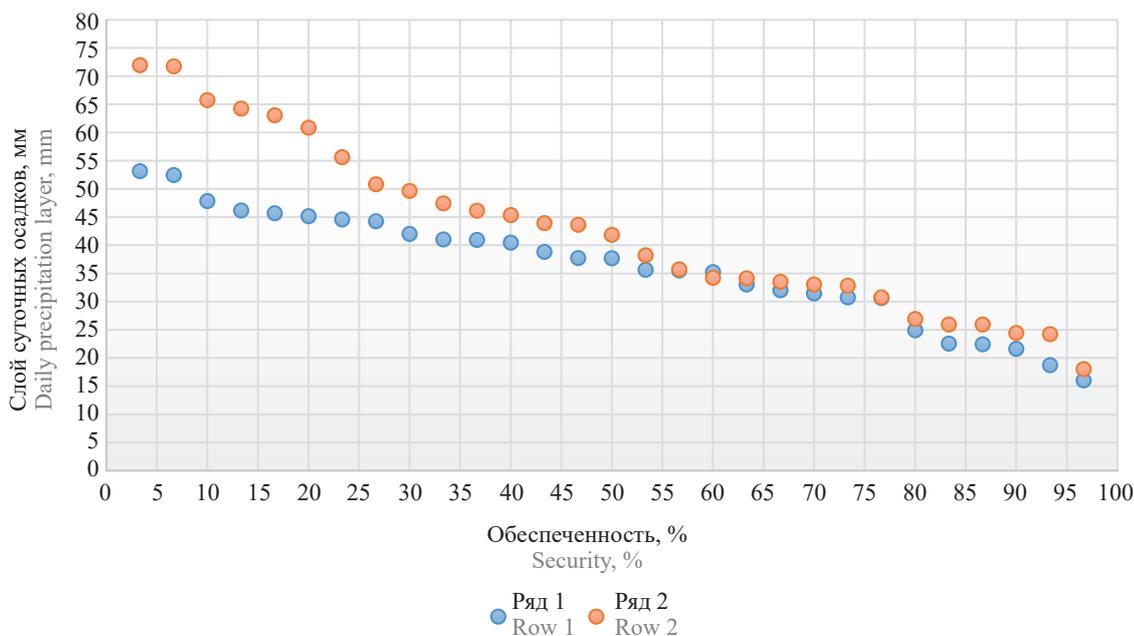


Рис. 2. Точки эмпирической вероятности превышения максимальных суточных осадков относительно двух рядов наблюдений: 1) 1963–1991; 2) 1992–2020

Fig. 2. Points of empirical probability of exceeding the maximum daily precipitation relative to two series of observations: 1) 1963–1991; 2) 1992–2020

методом приближенного наибольшего правдоподобия⁵ [19].

Очевидно значительное различие как между средними значениями, полученными за разный период, так и между расчетными значениями на 1 % обеспеченности. Различие между расчетными значениями 1%-ой обеспеченности между рядами 1 и 2 соответствует примерно 28 %.

Характеристики ландшафта оценивались на основе старой карты 1964 г. и современной картографической информации с космических спутников. Старая орографическая ландшафтная карта была подготовлена Генеральным штабом Советской армии в шестидесятых годах прошлого века (рис. 3). Эта карта использована для оценки гидрографических характеристик р. Локна и ее водосбора.

Для выявления ландшафтных характеристик водосбора применялась ГИС Surfer 13 на основе

картографической информации последних лет. Рельеф получен оцифровкой изолиний с равными отметками высот. Таким образом, получена электронная карта, один ее вариант показан на рис. 4.

Анализ старых и новых карт зафиксировал изменение ландшафта конкретных частей водосбора, в частности — часть природных и сельскохозяйственных территорий перешла в разряд города.

В разных моделях и формулах для определения максимального расхода воды^{1, 2} [16, 20] используются разные квантильные значения максимальных суточных осадков и разные гидрографические характеристики. Российская нормативная инструкция⁴ требует для бассейнов малых рек с площадью не более 200 км² использовать формулу:

$$Q_p = A_p \varphi H_{1\%} \delta \lambda_p F, \quad (2)$$

где $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков обеспеченности 1 %; φ — сборный коэффициент стока; $A_{1\%}$ — максимальный модуль стока ежегодной вероятностью превышения 1 %, выраженный в до-

⁵ Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л. : Гидрометеоздат, 1984.

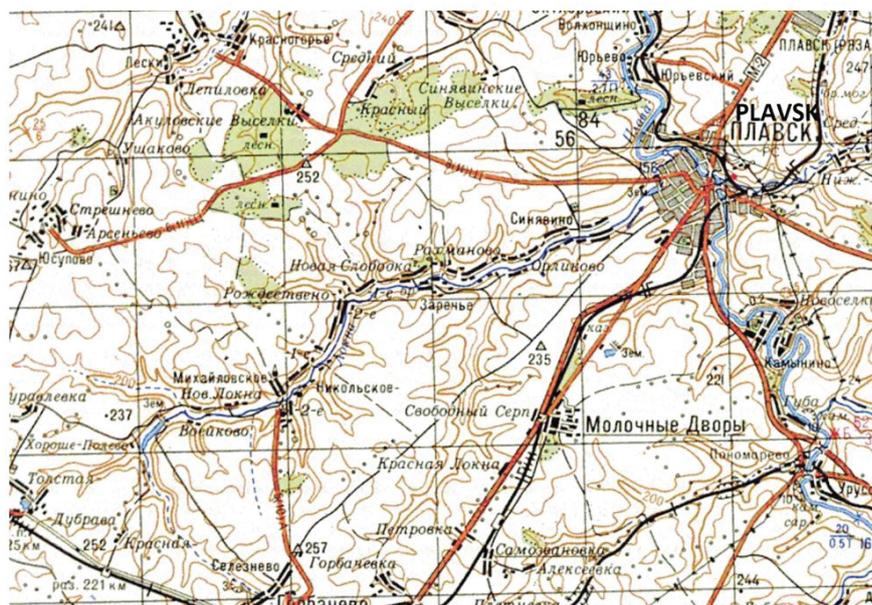


Рис. 3. Орографическая ландшафтная карта для оценки гидрографических характеристик исследуемой р. Локна и ее водосбора

Fig. 3. Orthographic landscape map for assessing the hydrographic characteristics of the Lokna River and its catchment area under study

Параметры и расчетные значения максимальных суточных осадков вероятности превышения 1 % относительно сравниваемых статистических рядов

Parameters and calculated maximum daily precipitation probability exceeding 1 % relative to the compared statistical series

Параметры Parameters	Среднее Average	C_v	C_s	$Q_{1\%}$
Ряд 1 Row 1	36,1	0,27	1,5	61,4
Ряд 2 Row 2	42,7	0,37	2,5	86,1
Весь ряд The whole row	39,4	0,33	2	75,6

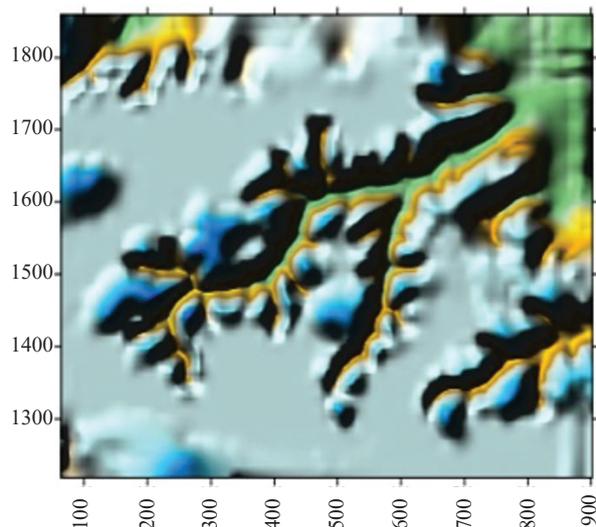


Рис. 4. Вариант электронной карты водосборной площади
 Fig. 4. Version of the electronic catchment area map

лях произведения $\varphi H_{1\%}$ при $\delta = 1$; δ — коэффициент, учитывающий влияние озер на максимальный расход; λ_p — переходный коэффициент к другой расчетной обеспеченности; F — площадь водосбора.

Формула предназначена для расчетов максимального расхода воды с исключительно малых водосборов, на которых не может быть особо ответственных сооружений выше третьего класса либо в особых случаях второго класса, поэтому в качестве наименьшей расчетной обеспеченности P может быть принята $P = 0,1\%$.

Параметр $A_{1\%}$ определяют для исследуемого района в зависимости от гидроморфометрической характеристики русла Φ_p и продолжительности склонового добега $\tau_{ск}$, мин.

Гидроморфометрическую характеристику русла исследуемой реки Φ_p рассчитывают по формуле:

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m_p I_p^m F^{0,25} (\varphi H_{1\%})^{0,25}}, \quad (3)$$

где m_p — гидравлический параметр русла; L — длина русла, км; I_p — уклон русла, ‰; m — специальный параметр русла.

Также необходимо вычислить и склоновую характеристику:

$$\Phi_{ск} = (1000L_{ск}) / [m_{ск} I_{ск}^{0,25} (\varphi H_{1\%})^{0,5}], \quad (4)$$

где $m_{ск}$ — коэффициент, характеризующий шероховатость склонов водосбора; $I_{ск}$ — уклоны склонов; $L_{ск}$ — средняя длина безрусловых склонов водосбора, определяемая по формуле:

$$L_{ск} = \frac{1}{\gamma \rho_p}, \quad (5)$$

где ρ_p — густота ручейковой сети; γ — коэффициент, принимаемый для односкатных склонов равным 0,9, для двускатных — 1,8, остальные имеют прежние значения.

Сборный коэффициент стока при отсутствии рек-аналогов вычисляется по формуле:

$$\varphi = C_2 \varphi_0 (I_{ск} / I_{ск}^*)^{n_2} / (F + 1)^{n_3}, \quad (6)$$

где C_2, n_2, n_3 — эмпирические параметры; $I_{ск}$ — средний уклон склонов водосбора; $I_{ск}^*$ принимается для обычных условий равным 50 ‰; φ_0 — сборный коэффициент стока, определяемый согласно требованиям⁵.

Как видно из приведенных формул (3)–(6), многие параметры зависят от ландшафтных характеристик, которые подвержены изменениям, в данной работе они выявлялись с помощью ГИС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью карт устанавливались следующие характеристики: площадь речного бассейна, длина русла, уклоны реки и склонов водосбора; площади разных видов ландшафта, имеющих разную шероховатость. Также имеется возможность рассчитывать площадь озер и прудов на водосборе для определения коэффициента δ .

Сравнение видов поверхности по старой карте и современной ГИС-карте показало, что имеются отличия, часть водосбора трансформировалась в городской пейзаж (асфальт, крыши домов), соответственно концентрация максимального дождевого стока по времени должна уменьшиться, а максимальный расход — увеличиться. Однако непосредственно оценить степень влияния изменения ландшафтных характеристик на изменение расчетного расхода воды затруднительно ввиду ограниченной точности определения косвенных параметров.

Максимальные расходы воды рассчитывались для условий старой карты при максимальных суточных осадках для первого периода, а также для условий современной карты и при максимальных суточных осадках для второго периода. Получены следующие значения максимальных расходов:

- за период 1963–1991 гг. — 69 м³/с;
- за период 1992–2020 гг. — 104 м³/с.

Таким образом, несмотря на некоторые неточности, обусловленные самой методикой расчетов, при отсутствии данных наблюдений и принятии ландшафтных характеристик с некоторым приближением можно констатировать, что расчетный максимальный расход увеличился примерно на 34 %. Если учесть, что количество осадков увеличилось примерно на 28 %, то можно сделать вывод: расход увеличился примерно на 5–6 % из-за изменения ландшафта. То есть, на повышение расчетного максимального расхода повлияло гораздо в большей степени повышение максимальных суточных осадков.

Следует также отметить следующее: несмотря на то, что действующий СП 33-101-2003 переиздан в 2004 г., однако при определении осадков заданной обеспеченности данное издание ссылается на карту осадков 1%-й обеспеченности приложения

к СП⁵, изданного в 1984 г., тем самым создавая предпосылку к существенному уменьшению реального на сегодня значения максимальных осадков. СП Строительная метеорология не имеет информации о дождевых осадках нормативной вероятности превышения. Практически вопрос об их должной оценке на сегодняшний день не решен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы исследования подтвердили гипотезы об увеличении значений ливневых осадков и о чувствительном изменении ландшафтных характеристик в последние десятилетия по отношению к исследуемому объекту.

Полученные результаты показали, что более короткие временные ряды наблюдений за ливневыми осадками за последние десятилетия (по сравнению с полным длительным временем наблюдения) дают более реальное представление об опасном квантиле распределения случайных величин ($P = 1\%$), которое используется для проектирования объектов строительства и оценки возможного затопления территории.

Влияние роста количества ливневых осадков при расчетах максимального расхода воды значительное, однако, расход изменяется и под влиянием преобразования ландшафта водосбора.

Сооружения, построенные в прошлом веке на рассмотренном бассейне реки, утратили надежность по отношению к наводнению с превышением нормативной вероятности.

В целом, по результатам исследования следует сделать вывод о том, что гидротехнические сооружения, построенные как во второй половине XX в. на малых водосборах во многих регионах, так и в последующие годы при использовании действующих строительных правил, не имеющих должной актуализации, — утратили изначальную надежность для своей степени ответственности (класса) сооружений.

В связи с наблюдающейся тенденцией изменения климатических и ландшафтных характеристик малых водосборов необходимо актуализировать нормативно-техническую документацию, используемую в расчетах паводкового дождевого стока для проектирования гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Belolubtsev A., Ivanova D., Kuzmova K., Dronova E., Ilinich V., Bazheeva A.* Approach to evaluation of change maximum daily precipitation on the base of long time observation // Danish Scientific Journal. 2019. Vol. 20–2. Pp 22–26.
2. *Groisman P.Ya., Knight R.W., Zolina O.* Recent Trends in Regional and Global Intense Precipitation Patterns // Climate Vulnerability, 1st Edition Understanding and Addressing Threats to Essential Resources. 2013. Pp. 25–52. DOI:10.1016/B978-0-12-384703-4.00501-3
3. *Belchikhina V.V., Ilinich V.V., Asaulyak I.F., Belolubtsev A.I.* Simulation of the precipitation scenarios on the river catchment with consideration of the climatic changes // Procedia Engineering. 2016. Pp. 665–669. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.567
4. *Zolina O., Simmer C., Kapala A., Shabanov P., Becker P., Mächel H., Gulev S.K., Groisman P.* Precipitation Variability and Extremes in Central Europe: New View from STAMMEX Results // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. Vol. 95. Issue 7. Pp. 995–1002. DOI: 10.1175/bams-d-12-00134.1
5. *Karl T.R., Trenberth K.E.* Modern global climate change // Science. 2003. Vol. 302. Issue 5. Pp. 1719–1723. DOI: 10.1126/science.1090228
6. *Золина О.Г., Булыгина О.Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103
7. *Ilinich V., Akulova E., Belchikhina V., Ponomarchuk K.* Estimation of Statistical Characteristics for Storm Precipitation with Long-term Data to Assess Climate Change // Journal of Climate Change. 2016. Vol. 2. Issue 2. Pp. 83–87. DOI: 10.3233/jcc-160019
8. *Ilinich V.V., Larina T.D.* Evaluation of changes storm Precipitation during century for the modeling of floods // Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change. London: Taylor & Francis Group, 2016. Pp. 928–934. DOI: 10.1201/b21902-153
9. *Лапушкин М.Ю., Ильинич В.В.* Оценка изменений характеристик штормовых дождей на севере Москвы, влияющих на надежность гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2020. № 3. С. 2–5.
10. *Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н.* Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью на европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 23–35.
11. *Черенкова Е.А.* Влияние изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана на тренды летних осадков на Европейском Севере России по наземным и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 229–238. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-229-238
12. *Ilinich V., Belolubtcev A., Cavalli A., Veliev I., Lapushkin M.* Modeling of storm precipitation // Proceedings of the 11th Int. Conference on Urban Drainage Modeling. 2018. Pp. 466–469.

13. Ilinich V., Perminov A., Belolubtsev A., Naumova A. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers // *Advances in Hydroinformatics*. 2019. Pp. 717–725.

14. Cavalli A.B., Ilinich V.V., Lapushkin M.Y., Naumova A.A. Evaluation and stochastic simulation of storm precipitation for city underground utilities in condition of climate change // 13th International Conference on Hydroinformatics. Palermo, 2018. Pp. 389–393. DOI: 10.29007/986f

15. Волосухин В.А., Белоконев Е.Н. Научное обоснование повышения надежности водосбросных сооружений гидроузлов. Новочеркасск : Новочеркасская гос. мелиоративная акад., 2008. 193 с.

16. Рейно Д., Тилен Дж., Саламон П., Бурек П., Анкентин С., Альфьери Л. Совместное использова-

ние динамического стока для улучшения раннего предупреждения о внезапных наводнениях в Европе: оценка наводнений в Центральной Европе 2013 года в Германии // *Метеорологические приложения*. 2015. № 22 (3). С. 410–418.

17. *Statistical methods in the Atmospheric Sciences* / Ed. R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby // *Inter. Geoph. Series*. 2011. Vol. 1. P. 668.

18. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник. Изд. 2. СПб. : РГГМУ, 2007. 279 с.

19. Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока. М. : Наука, 1974. 169 с.

20. Раткович Л.Д. Аспекты развития теории и практики водохозяйственных расчетов // *Труды VI Всероссийского гидрологического съезда в Санкт-Петербурге*. М. : Росгидромет, 2006. С. 188–192.

Поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 10 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виталий Витальевич Ильинич** — кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры метеорологии и климатологии; **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49; РИНЦ ID: 134238, ORCID: 0000-0003-2094-2882; vilinitch@gmail.com;

Алексей Васильевич Перминов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока; **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49; РИНЦ ID: 4660-8322; alexperminov@mail.ru;

Анна Анатольевна Наумова — старший преподаватель кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока; **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49; РИНЦ ID: 1010469; koshevaya81@mail.ru.

REFERENCES

1. Belolubtsev A., Ivanova D., Kuzmova K., Dronova E., Ilinich V., Bazheeva A. Approach to evaluation of change maximum daily precipitation on the base of long time observation. *Danish Scientific Journal*. 2019; 20-2:22-26.

2. Groisman P.Y., Knight R.W., Zolina O. Recent Trends in Regional and Global Intense Precipitation Patterns. *Climate Vulnerability, 1st Edition Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*. 2013; 25-52. DOI:10.1016/B978-0-12-384703-4.00501-3

3. Belchikhina V.V., Ilinich V.V., Asaulyak I.F., Belolubtsev A.I. Simulation of the precipitation scenarios on the river catchment with consideration of the climatic changes. *Procedia Engineering*. 2016; 665-669. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.567

4. Zolina O., Simmer C., Kapala A., Shabanov P., Becker P., Mächel H., Gulev S.K., Groisman P. Precipitation Variability and Extremes in Central Europe: New View from STAMMEX Results. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014; 95(7):995-1002. DOI: 10.1175/bams-d-12-00134.1

5. Karl T.R., Trenberth K.E. Modern global climate change. *Science*. 2003; 302(5):1719-1723. DOI: 10.1126/science.1090228

6. Zolina O.G., Bulygina O.N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2016; 1:84-103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103 (rus.).

7. Ilinich V., Akulova E., Belchikhina V., Ponomarchuk K. Estimation of Statistical Characteristics for Storm Precipitation with Long-term Data to Assess Climate Change. *Journal of Climate Change*. 2016; 2(2):83-87. DOI: 10.3233/jcc-160019

8. Ilinich V.V., Larina T.D. Evaluation of changes storm Precipitation during century for the modeling of floods. *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change*. London, Taylor & Francis Group, 2016; 928-934. DOI: 10.1201/b21902-153

9. Lapushkin M., Ilinich V. Assessment of changes characteristics of the storm rains in the north of Moscow that are impact on the reliability of hydrotechnical con-

structions. *Hydrotechnical Construction*. 2020; 3:2-5. (rus.).

10. Cherenkova E.A., Bardin M.Yu., Zolotokrylin A.N. The statistics of precipitation and droughts during opposite phases of the quasi-biennial oscillation of atmospheric processes and its relation to the yield in the European part of Russia. *Meteorology and Hydrology*. 2015; 3:23-35. (rus.).

11. Cherenkova E.A. Influence of changes in large-scale atmospheric circulation and ocean surface temperature on the trends of summer precipitation in the north of European Russia based on terrestrial and satellite data. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15(5):229-238. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-229-238 (rus.).

12. Ilinich V., Belolubtcev A., Cavalli A., Veliev I., Lapushkin M. Modeling of storm precipitation. *Proceedings of the 11th Int. Conference on Urban Drainage Modeling*. 2018; 466-469.

13. Ilinich V., Perminov A., Belolybcev A., Naumova A. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers. *Advances in Hydroinformatics*. 2019; 717-725.

14. Cavalli A.B., Ilinich V.V., Lapushkin M.Y., Naumova A.A. Evaluation and stochastic simulation

of storm precipitation for city underground utilities in condition of climate change. *13th International Conference on Hydroinformatics*. Palermo, 2018; 389-393. DOI: 10.29007/986f

15. Volosuhin V.A., Belokonev E.N. *Scientific justification for improving the reliability of waterworks spillways*. Novochoerkassk, Novochoerkassk State Melioration Academy, 2008; 193. (rus.).

16. Raynaud D., Thielen J., Salamon P., Burek P., Anquetin S., Alfieri L. A dynamic runoff coefficient to improve flash flood early warning in Europe: Evaluation on the 2013 central European floods in Germany. *Meteorological Applications*. 2015; 22(3):410-418. (rus.).

17. Statistical methods in the Atmospheric Sciences / Ed.R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby. *Inter. Geoph. Series*. 2011; 1:668.

18. Sikan A.V. *Methods of statistical processing of hydrometeorological information*. Ed. 2. St. Petersburg, RGGMU, 2007; 279. (rus.).

19. Blohinov E.G. *Probability distribution of river runoff values*. Moscow, Nauka, 1974; 169. (rus.).

20. Ratcovich L.D. Aspects of the development of theory and practice of water management calculations. *Proceedings of VI Russian hydrological congress in Sanct-Peterburg*. Moscow, Rosgidromet, 2006; 188-192. (rus.).

Received July 19, 2021.

Adopted in revised form on September 10, 2021.

Approved for publication on September 10, 2021.

B I O N O T E S: **Vitaly V. Ilinich** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Meteorology and Climatology; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev)**; 49 Timiryazev st., Moscow, 127434, Russian Federation; ID RISC: 134238, ORCID: 0000-0003-2094-2882; vilinitch@gmail.com;

Aleksey V. Perminov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydrology, Hydrogeology and Flow Regulation; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev)**; 49 Timiryazev st., Moscow, 127434, Russian Federation; ID RISC: 4660-8322; alexperminov@mail.ru;

Anna A. Naumova — Senior Lecturer of the Department of Hydrology, Hydrogeology and Flow Regulation; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev)**; 49 Timiryazev st., Moscow, 127434, Russian Federation; ID RISC: 1010469; koshevaya81@mail.ru.

Современные способы и средства диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов

Ю.А. Рыльцева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предмет обзорного исследования — процесс диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов, транспортирующих природную и сточную воду, газ, нефть и нефтепродукты. Комплексная диагностика способствует поддержанию надежности функционирования трубопроводной сети, снижает текущие расходы на ремонтно-восстановительные работы, имеет высокое природоохранное значение, но вместе с тем характеризуется высокими трудозатратами и стоимостью. Оптимизация процедуры диагностики позволяет сократить затраты труда, денежных средств и состоит в подборе наиболее приемлемых для рассматриваемого участка сети технических средств и методов обследования, последовательности выполняемых работ. Не менее важны вопросы текущего и капитального ремонта таких объектов: выбор наиболее оптимальных инженерно-технических решений имеет значительный ресурсосберегающий эффект. Цель исследования — представление и описание наиболее эффективных на сегодняшний день методов и средств диагностики и ремонта подводных трубопроводов.

Материалы и методы. Проведен обзор актуальной на сегодняшний день нормативно-технической документации, проанализированы научные труды отечественных и зарубежных ученых, методические разработки и патенты организаций, эксплуатирующих и обслуживающих подводные переходы. Рассмотрены современные приборы, аппараты и материалы, используемые для проведения комплексной диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов. Основной метод исследования — документальный.

Результаты. Выполнены систематизация и анализ информации по современным способам и передовым средствам диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов. Приведены виды, методы и этапы диагностики, приборы и аппараты для проведения обследования, способы обнаружения утечек, виды, способы и этапы ремонта, приборы, аппараты и материалы, используемые для ремонтно-восстановительных работ, способы демонтажа подводных переходов. Обозначены границы применимости рассмотренных способов и средств.

Выводы. Теоретическая значимость обзорного исследования состоит в целостном описании способов и средств диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов, практическая — в возможности использования результатов специалистами сферы трубопроводного транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подводные переходы трубопроводов, подводные дюкеры, диагностика, обследование, внутритрубная диагностика, неразрушающий контроль, ремонт, демонтаж

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыльцева Ю.А. Современные способы и средства диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1236–1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1236-1263

The modern methods and means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines

Yuliya A. Ryltseva

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

ABSTRACT

Introduction. The subject of the study is the process of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines that transport natural and waste water, gas, oil and petroleum products. Comprehensive diagnostics helps to maintain the reliability of the pipeline system, reduces the cost of repair and restoration work, and also has a high environmental value. Optimization of the diagnostic procedure includes the selection of the most appropriate technical means and methods of inspection and the sequence of work for the location. No less important for organizations that maintain and operate underwater crossings are the issues of current and major repairs of such facilities: the choice of the most optimal engineering and technical solutions has a significant resource-saving effect. The purpose of this work is to present and describe the most effective methods and tools for diagnostics and repair of underwater pipelines to date.

Materials and methods. In order to fully study the processes of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines, a review of the relevant regulatory and technical documentation was conducted, scientific works of domestic and foreign scientists were analyzed, methodological developments and patents of organizations operating and servicing underwater crossings were considered. The review of the market of modern devices, devices and materials used for complex diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines was carried out. The main method of research is documentary.

Results. Based on the survey, systematization and analysis of information on modern methods and advanced means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines were carried out. The types, methods and stages of diagnos-

tics, devices and apparatuses for conducting surveys of underwater crossings, methods for detecting leaks, types, methods and stages of repairs, devices, apparatuses and materials used for carrying out repair and restoration work, methods of dismantling underwater crossings are considered. The limits of applicability of the considered methods and means of diagnostics and repair were outlined.

Conclusions. The theoretical significance of the research consists in a complete description of the methods and means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines. The practical significance is the possibility of using the results of the research by specialists in the field of pipeline transport of natural and waste water, gas, oil and petroleum products.

KEYWORDS: underwater crossings of the pipelines, underwater dukers, diagnostics, inspection, in-tube diagnostics, non-destructive check, repair, dismantling

FOR CITATION: Ryltseva Yu.A. The modern methods and means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1236-1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1236-1263 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Подводные переходы трубопроводов (подводные дюкеры) относятся к одним из наиболее ответственных участков сети. Их прокладка выполняется под строгим контролем, поскольку ремонт таких объектов по стоимости и срокам сопоставим с новым строительством. Согласно статистическим исследованиям [1–3], основными причинами аварий подводных переходов трубопроводов являются (в процентном отношении): повреждения в результате внешних воздействий — 33 %; ошибки проектирования и монтажа — 24 %; брак, допущенный при производстве труб, — 17 %; наружная коррозия — 20 %; нарушения регламента эксплуатации — 6 %. Аварии на подводных переходах, транспортирующих сточные воды или нефтепродукты, могут приводить к чрезвычайным ситуациям, наносящим значительный урон окружающей природной среде [4–6]. Задача служб эксплуатации и ремонта подводных переходов — поиск оптимальных инженерно-технических решений, обеспечивающих высокое качество проводимых диагностических и ремонтно-восстановительных работ, сокращение сроков их выполнения, снижение материальных затрат; а также исключающих негативное воздействие на экологию [7–9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект обзорного исследования — подводные переходы трубопроводов, транспортирующие природную и сточную воду, газ, нефть и нефтепродукты. Предмет исследования — процесс диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов. С целью освещения современного состояния проблемы обследования и ремонта подводных переходов трубопроводов проведен обзор актуальной на сегодняшний день нормативно-технической документации; научной литературы; отечественных и зарубежных периодических изданий; охраняемых документов, изданных за последние десять лет; а также информации, представленной на официальных веб-сайтах компаний, производящих оборудование для обследования и ремонта подводных переходов трубопроводов, предлагающих услуги по диагностике, монтажу и ремонту таких объектов. Проанализированы и систематизированы

материалы, отражающие цели, задачи и порядок комплексной диагностики, мелкого и капитального ремонта, приборы, материалы и аппараты для их проведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Качественная диагностика состояния подводных переходов трубопроводов способствует обоснованному планированию ремонтных работ, эффективной их реализации, снижению текущих расходов на обеспечение безаварийной эксплуатации, а также повышению безопасности функционирования объекта в целом. Комплексное обследование подводных дюкеров включает внешнее и внутреннее диагностирование. Внешнее предусматривает: определение местоположения трубопроводной сети, осмотр ее поверхности (может выполняться с применением авиации, плавательных средств и водолазного снаряжения), приборное обследование поверхности трубопровода и изоляции, мониторинг состояния русла. Внутреннее диагностирование предполагает оценку состояния трубопроводной сети, осуществляемую посредством проникновения в ее внутреннее пространство. В научной литературе, помимо вышеприведенной классификации работ по обследованию, предлагается также разделение инспекций на периодические (выполняемые в соответствии с утвержденным планом) и специальные (выполняемые в оперативном порядке после аварий, природных катаклизмов). При этом в работах [10, 11] отмечается, что время периодических обследований следует совмещать с периодами благоприятных погодных условий.

Существуют различные методы неразрушающего контроля технического состояния и положения относительно профиля дна подводных переходов трубопроводов [12–17]:

- 1) магнитографические (основаны на фиксации изменений линий магнитного поля в зоне дефектов стенки трубы и изоляции);
- 2) ультразвуковые (основаны на изменении характера отражения звуковых ультразвуковых волн в зоне дефекта трубы);
- 3) электромагнитные (аналогичны магнитографическим, но предполагают использование

электромагнитных датчиков, а не датчиков из магнетитов) [18];

4) радиографические (базируются на применении γ -излучения).

Электромагнитные методы обследования можно классифицировать на две группы [19, 20]:

- методы, основанные на измерении собственных электромагнитных полей трубопроводов;
- методы, основанные на измерении электромагнитных полей, которые были наведены на трубопровод специальными системами.

Отдельно можно выделить методы обнаружения утечек из подводных переходов трубопроводов [10, 21–24]:

1) оптические (предполагают добавление в транспортируемую по трубопроводу среду красящего флуоресцентного вещества и дальнейшее его обнаружение под лучом света определенного спектра над трубопроводной трассой);

2) акустические (базируются на фиксации акустического сигнала, вызываемого турбулентностью жидкости при ее истечении в пространство с низким давлением) [25, 26];

3) химические (предполагают использование анализаторов, определяющих присутствие в воде веществ транспортируемой среды; наиболее часто применяются для обнаружения нефтепродуктов) [19];

4) физические (основаны на применении контрольно-измерительных приборов для учета уровня давления и расхода в трубопроводной сети) [27].

Следует отметить, что утвержденная нормативно-техническая документация, устанавливающая требования к обследованию подводных водопроводных и канализационных дюкеров, на сегодняшний день отсутствует на территории РФ. СП 272.1325800.2016¹ предусматривает общий регламент диагностики водоотводящих сетей и колодцев, основывающийся главным образом на визуальных методах. «Методические рекомендации по определению технического состояния систем теплоснабжения, горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и водоотведения» (утверждены 25.04.2012) также не содержат отдельных сведений по процессу диагностики подводных участков сетей.

Процедура диагностики подводных газопроводов и нефтепродуктопроводов в целом регламентируется ведомственной нормативно-технической документацией: СТО Газпром 2-2.3-1058-2016², СТО Газпром

2-2.3-1059-2016³, СТО Газпром 2-2.3-1050-2016⁴, РД-23.040.00-КТН-387-07⁵. Наружной инспекцией контролируются параметры [28]: профиль трубопровода, топография дна водного объекта, толщина слоя грунта над трубопроводом, состояние антикоррозийной защиты, техническое состояние трубопровода, геотехнические характеристики грунтовых массивов. Внутритрубная диагностика таких объектов, как правило, предполагает следующие этапы: прочистка полости диагностируемого участка до степени чистоты, устанавливаемой нормативно-технической документацией; пропуск снарядов-профилемеров; снарядов-дефектоскопов (робототехнических устройств); экспресс-анализ полученной информации; пропуск стресс-коррозионного снаряда; общий анализ диагностического исследования; подготовка отчетной документации. Внутритрубной инспекцией контролируются следующие параметры [28]: внутренняя геометрия трубы, потери металла (коррозия, трещины, эрозия), профиль трубопровода (смещения в плане или по высоте, произошедшие в результате размыва грунта).

Российскими компаниями производится профессиональная подводная аппаратура для обеспечения видео- и аудиосвязи с водолазами, телесъемки проводимого ремонта и работ по обследованию подводных переходов трубопроводов, освещения места проведения работ. Краткий обзор такой аппаратуры представлен в табл. 1.

Российскими учеными создаются инновационные приборные комплексы для проведения диагностических исследований подводных дюкеров. Документом [29] защищены способ оценки технического состояния подводных коммуникаций и устройство для его реализации, отличающееся от аналогов возможностью оперативного получения информации (непосредственно при проходе судна-носителя над диагностируемой коммуникацией) о состоянии объекта, возможностью отклонения судна-носителя от оси диагностируемого трубопровода. Описываемый способ предполагает использование гидроакустических средств для определения топографии дна и диагностику технического состояния трубопровода (в том числе изоляционного покрытия) на основании измерения параметров электромагнитного поля.

В работе [30] описан положительный опыт применения длинноволновой ультразвуковой системы Wavemaker (компании Guided Ultrasonics Ltd.,

³ СТО Газпром 2-2.3-1059-2016. Комплексное техническое диагностирование подводных переходов магистральных газопроводов. Общие положения.

⁴ СТО Газпром 2-2.3-1050-2016. Внутритрубное техническое диагностирование. Требования к проведению, приемке и использованию результатов диагностирования: утв. распоряжением ПАО «Газпром» № 37 от 24.02.2016.

⁵ РД-23.040.00-КТН-387-07. Методика диагностики технологических нефтепроводов НПС. М. : ОАО «Транснефть», 2007.

Табл. 1. Приборы и аппаратура для сопровождения водолазных работ по обследованию и ремонту подводных переходов трубопроводов

Table 1. Devices and equipment for diving operations for examination and repair of underwater crossings of the pipeline

Наименование прибора, производитель Name of the device, manufacturer	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
<p>Станция водолазной связи однопостовая малогабаритная СВС-1ПМ (АО «Тетис Про», Россия, г. Москва) The diving communication station single-post small-sized SVS-1PM (Tethys ProComp., Russia)</p>		<p>Предназначена для телефонной связи водолаза и оператора; питание может осуществляться как от внешних источников посредством кабеля, так и от встроенного аккумулятора; оснащена функцией аудиозаписи; масса до 0,5 кг The station is designed for telephone communication between the diver and the operator; power can be provided both from external sources through a cable and from the built-in battery; it is equipped with an audio recording function; weight up to 0.5 kg</p>
<p>Станция водолазной проводной связи СВС-2П-М (АО «Тетис Про», Россия, г. Москва) The diving cable communication station SVS-2P-M (Tethys Pro Comp., Russia)</p>		<p>Предназначена для телефонной связи между оператором и одним или двумя водолазами; обеспечивает высокое качество связи; простота конструкции предоставляет возможность ремонта в полевых условиях; смонтирована в ударопрочном и влагозащитном кейсе с размерами 170 × 270 × 320 мм; возможна работа от встроенного аккумулятора The station is designed for telephone communication between the operator and one or two divers; provides high quality communication; simple design provides the possibility of repair in the field; mounted in a shock-resistant and moisture-proof case with dimensions of 170 × 270 × 320 mm; it can work from the built-in battery</p>
<p>Водолазная телефонная станция ВТС-10 (ООО «Аквалсервис», Россия, г. Великие Луки) The diving telephone station VTS-10 (Akvavelservis Comp., Russia)</p>		<p>Предназначена для обеспечения аудиосвязи между оператором и двумя водолазами; оборудована системой подавления шумовых помех; возможна работа от аккумулятора на протяжении двух часов; устройство смонтировано в кейсе с размерами 480 × 370 × 190 мм The station is designed to provide audio communication between the operator and two divers; equipped with a noise suppression system; battery operation is possible for 2 hours; the device is mounted in a case with dimensions of 480 × 370 × 190 mm</p>
<p>Система профессионального подводного телевидения ПТВ-10 (ПТВ-11, ПТВ-12) (ООО «Аквалсервис», Россия, г. Великие Луки) The professional underwater television system PTV-10 (PTV-11, PTV-12) (Akvavelservis Comp., Russia)</p>		<p>Предназначена для проведения аудио- и видеосъемки подводных работ; оснащена цветным монитором с диагональю 15 дюймов; предусматривает возможность подключения осветительных приборов; система смонтирована в транспортном кейсе (габарит различен в сериях) The station is designed for audio and video recording of underwater operations; equipped with a colour monitor with a diagonal of 15 inches; provides for the possibility of connecting lighting devices; the system is mounted in a transport case</p>

Наименование прибора, производитель Name of the device, manufac- turer	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
Стационарный водолазный комплекс СВК-001 (ООО «Аквалсервис», Россия, г. Великие Луки) The stationary diving complex SVK-001 (Akvavelservis Comp., Russia)		Совмещает в себе три устройства: систему освещения, устройство аудиосвязи между оператором и двумя водолазами, блок видеорегистрации с возможностью записи до нескольких суток It combines three devices: lighting system, audio communication device between the operator and two divers, video recording unit with the ability to record up to several days
Подводный галогеновый светильник ПГС-12/50 (ООО «Аквалсервис», Россия, г. Великие Луки) The underwater halogen lamp PGS-12/50 (Akvavelservis Comp., Russia)		Предназначен для освещения рабочего пространства водолаза; имеет противоударное стекло; рабочая глубина — 60 м It is designed to illuminate the diver's workspace; has shockproof glass; working depth — 60 m
Проектор подводный ПП-2 (ПП-2-СД) (АО «Тетис Про», Россия, г. Москва) The underwater searchlight PP-2 (PP-2-SD) (Tethys Pro Comp., Russia)		Предназначен для интенсивного надводного и подводного освещения; суммарная мощность 400 Вт (ПП-2) и 160 Вт (ПП-2-СД); срок службы светильников не менее 1000 ч; высокая механическая прочность и антикоррозионная защита It is designed for intensive surface and underwater lighting; total power of 400 W (PP-2) and 160 W (PP-2-SD); the service life of the lamps is not less than 1000 hours; high mechanical strength and anti-corrosion protection

Примечание: Источник информации: официальные сайты компаний АО «Тетис Про» (URL: <http://www.tetis-pro.ru/>), ООО «Аквалсервис» (URL: <https://avs-diver.tiu.ru/>)

Note: Source of information: official websites of Tethys Pro Comp. (URL: <http://www.tetis-pro.ru/>), Akvavelservis Comp. (URL: <https://avs-diver.tiu.ru/>)

Великобритания) для диагностики и мониторинга трубопроводов, доступ к которым затруднен, в частности, подводным дюкерам. Преимуществом системы является то, что информация о техническом состоянии трубопровода (протяженностью до 50 м) может быть получена путем установки кольца с пьезоэлектрическими преобразователями (рис. 1) в одной точке сети без его множественных перемещений. Помимо кольца, система Wavemaker включает блок управления и программное обеспечение WavePro для персонального компьютера. Система обнаруживает места образования трещин, коррозионные и механические повреждения с потерей металла до 5 %, дефекты сварных соединений. При этом не требуется снятие изоляции со всего диагностируемого участка сети (достаточно выполнить зачистку только в месте установки кольца), наличие фланцевых соединений не снижает эффективности диагностики.

К системам ультразвукового скрининга Wavemaker производитель предлагает кольца с пьезоэ-

лектрическими преобразователями различных конструкций (табл. 2).

Российскими организациями, занимающимися эксплуатацией, обследованием подводных переходов трубопроводных сетей, накоплен положительный опыт использования отечественных электронных информационных систем (ИС «Дюкер», ИС «Дюкер 2.0» [31]), позволяющих не только хранить, систематизировать информацию об объекте, но и обеспечивать комплексную оценку технического состояния подводного перехода, формировать отчетную документацию (в том числе в графической форме) [32]. Кроме того, данные ИС в автоматизированном режиме при необходимости предоставляют информацию о сроках и стоимости ремонтных работ [28]. Для обработки гидроакустических изображений, полученных в ходе диагностических обследований, хорошо зарекомендовал себя программный комплекс НУРАСК (США) [33].

Представляет интерес способ обнаружения утечек из подводного трубопровода, проложенного

Табл. 2. Инспекционные кольца для ультразвуковых систем Wavemaker (производитель — компания Guided Ultrasonics Ltd., Великобритания)

Table 2. Inspection rings for ultrasonic systems Wavemaker (manufacturer — Guided Ultrasonics Ltd., UK)

Наименование кольца Name of the ring	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
Кольцо «Compact» Ring “Compact”		Подходит для окрашенных поверхностей; предназначено для труб диаметром от 150 до 900 мм; диапазон температур от –40 до +150 °С It is suitable for painted surfaces; it is designed for pipes with a diameter of 150 to 900 mm; temperature range from –40 to +150 °C
Кольцо «EFC» Ring “EFC”		Подходит для окрашенных труб и труб с антикоррозийным покрытием; пневматическое давление используется для прижатия модулей преобразователей к стенке трубы; предназначено для труб диаметром от 150 до 1500 мм; диапазон температур от –40 до +150 °С It is suitable for painted pipes and pipes with anti-corrosion coating; pneumatic pressure is used to press the converter modules against the pipe wall; it is designed for pipes with a diameter of 150 to 1500 mm; temperature range from –40 to +150 °C
Кольцо «HT» Ring “HT”		Подходит для окрашенных поверхностей; предназначено для труб диаметром от 150 до 900 мм; диапазон температур от –40 до +350 °С It is suitable for painted surfaces; It is suitable for pipes with a diameter of 150 to 900 mm; temperature range from –40 to +350 °C
Кольцо «HD» Ring “HD”		Относится к категории высокочувствительного оборудования; способно обнаруживать точечную коррозию; подходит для окрашенных поверхностей, трубопроводных участков с большим количеством приварных и бетонных опор; предназначено для труб диаметром от 150 до 900 мм; диапазон температур от –40 до +150 °С It belongs to the category of highly sensitive equipment; it is able to detect pitting corrosion; it is suitable for painted surfaces, pipeline sections with a large number of welded and concrete supports; it is intended for pipes with a diameter of 150 to 900 mm; the temperature range is from –40 to +150 °C

в футляре (технология «труба в трубе», производство которой нормируется СП 422.1325800⁶), описываемый в работе [34]. Способ заключается в размещении

⁶ СП 422.1325800.2018. Трубопроводы магистральные и промышленные для нефти и газа. Строительство подводных переходов и контроль выполнения работ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554403580/>

в пространстве между футляром и наружной стенкой трубы биморфных пьезоэлементов, предназначенных для преобразования динамических деформаций (возникают при выходе транспортируемой среды из трубопроводной сети через свищи) в электрические сигналы с последующей их обработкой и регистрацией (рис. 2). Пьезоэлементы позволяют достаточно точно



Рис. 1. Ультразвуковая система «Wavemaker» (Великобритания) для диагностики дюкеров [30]

Fig. 1. Ultrasonic system “Wavemaker” (Great Britain) for the diagnosis of dukers [30]

определять место утечки, что сокращает время проведения диагностических и ремонтных работ.

Усиленный контроль утечек применяется, как правило, в отношении подводных газо- и нефтепроводов [35, 36]. К наиболее передовым технологиям обнаружения эксфильтрации газа и нефти можно отнести использование датчиков давления и расхода, располагаемых на береговых частях трубопроводной сети. Все датчики подключаются к единой компьютерной системе, которая обеспечивает непрерывный контроль состояния трубопровода, позволяет определять утечки с расходом до 1 % от общего, место утечки с точностью до 10 % от длины подводного перехода. Диагностика утечек осуществляется не-

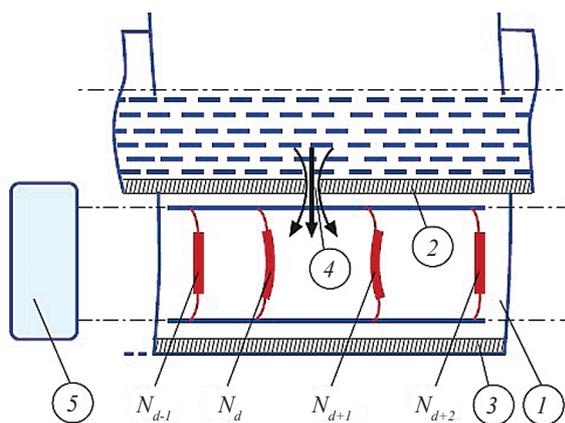


Рис. 2. Схема определения места утечки из подводного трубопровода, проложенного в футляре, с использованием пьезоэлементов: 1 — пространство между трубопроводом и футляром; 2 — трубопровод; 3 — футляр; 4 — место повреждения трубы; 5 — контроллер; N — пьезоэлементы [34]

Fig. 2. Scheme for determining the location of a leak from an underwater pipeline laid in a case using piezoelectric elements: 1 — the space between the pipeline and the case; 2 — the pipeline; 3 — the case; 4 — the place of damage to the pipe; 5 — the controller; N — piezoelectric elements [34]

сколькими методами: диагностика по волне давления, анализ эпюр давления по длине всего подводного перехода трубопровода, метод массового баланса транспортируемой среды в начале и в конце участка перехода [27].

К альтернативным методам устранения утечек нефтепродуктов и минимизации их негативного воздействия на водный объект можно отнести изобретение [37]. Устройство (рис. 3) предполагает размещение гибкого нефтенепроницаемого полотна вдоль всей траншеи подводного трубопровода. Полотно снабжено рукавами для откачки нефтепродукта, а также сигнальными устройствами поплавкового

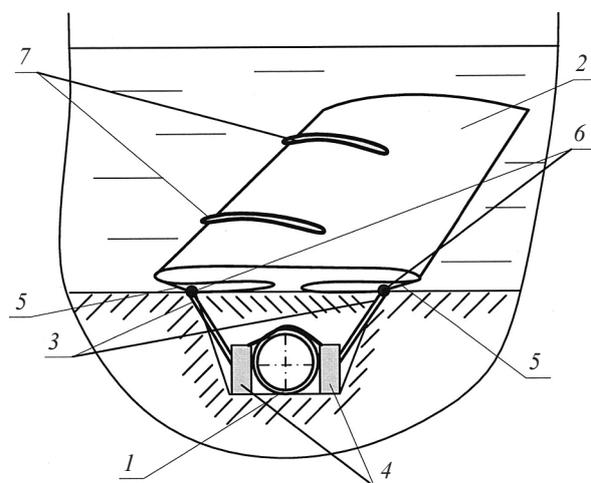


Рис. 3. Устройство для защиты водной среды от загрязнений, возникающих в результате утечек перекачиваемого продукта нефтяного происхождения из подводного трубопровода: 1 — подводный трубопровод; 2 — гибкое нефтенепроницаемое полотно; 3 — грузило; 4 — балластирующее устройство; 5 — стропа; 6 — датчик утечки; 7 — рукав для откачки нефтепродукта; 8 — подключающее устройство поплавкового типа (условно не показано); 9 — устройство сигнализации местонахождения рукава для откачки продукта нефтяного происхождения (условно не показано) [37]

Fig. 3. Device for protecting the water environment from pollution resulting from leaks of the pumped product of oil origin from the underwater pipeline: 1 — underwater pipeline; 2 — flexible oil-proof cloth; 3 — sinker; 4 — ballasting device; 5 — sling; 6 — leak sensor; 7 — hose for pumping oil products; 8 — connecting device of float type (conditionally not shown); 9 — device for signaling the location of the sleeve for pumping the product of oil origin (conditionally not shown) [37]

типа, всплывающими на поверхность воды при наполнении свода полотна.

В работе [38] предложен способ определения координат места прорыва подводного трубопровода, заключающийся в закачивании в него вещества, образующего пену при взаимодействии с морской или пресной водой. Координаты места прорыва определяются по возникающим на поверхности воды пен-

ным «меткам» с учетом придонных и поверхностных течений по аналитическим зависимостям.

В настоящее время для диагностики подводных переходов газо- и нефтепроводов используется современное высокоточное оборудование: многолучевые и узколучевые эхолоты, гидроакустические (ультразвуковые) профилографы, гидролокаторы бокового и кругового обзора [39–41], измерители направлений и скоростей течения воды, спутниковые навигационные системы [42], магнитные трассоискатели (принцип действия перечисленного оборудования подробно описан в трудах [43, 44]). Гидролокаторы бокового обзора рекомендуется применять на больших глубинах, в акваториях большой площади, гидролокаторы кругового обзора — напротив, имеют применимость в условиях малой глубины, в стесненных условиях. Гидролокатор бокового обзора посылает ультразвуковой импульс на поверхность дна под острым углом, а затем принимает отраженный сигнал. Такие приборы подразделяют на аналоговые и цифровые (последние — более современные). Гидролокатор кругового обзора позволяет вести съемку в труднодоступных местах, он более компактен, пригоден для исследований в условиях Крайнего Севера [45]. Результатом гидролокационного обследования являются сонограммы, интерпретация растровых изображений которых позволяет сделать заключение о геоморфологических особенностях рельефа дна, геологии грунтов, положении дюкера, определить размытые участки сети, провисы, расположение балластировочных пригрузов относительно трубы. В работе [46] сообщается, что для мониторинга подводных трубопроводов, проложенных непосредственно по дну (без заглужения), наиболее удобным и вместе с тем эффективным методом является гидролокация бокового обзора в комплексе с высокочастотным эхолотированием. При этом указанная технология не дает удовлетворительных результатов в отношении диагностики заглуженных в траншее трубопроводов. На основании опыта применения различного акустического оборудования для зондирования заглуженных трубопроводов учеными был сделан вывод о том, что наиболее приемлемым методом в данном случае служит использование узколучевых параметрических низкочастотных эхолотов-профилографов. Однако и он имеет ограничения: если грунт вокруг трубопровода неоднороден, содержит большое количество отражающих акустический сигнал включений, обнаружение трубы на эхограммах становится затруднительным, с этой задачей может справиться только высокоопытный специалист.

Для внутритрубной диагностики газо- и нефтепроводов большое распространение получили снаряды-дефектоскопы (интеллектуальные поршни [12, 47]) (рис. 4). Такие приборы дают возможность одновременно получать сведения о пространственной конфигурации трубопровода, геометрии стенок трубы, а также осуществлять контроль технического состоя-

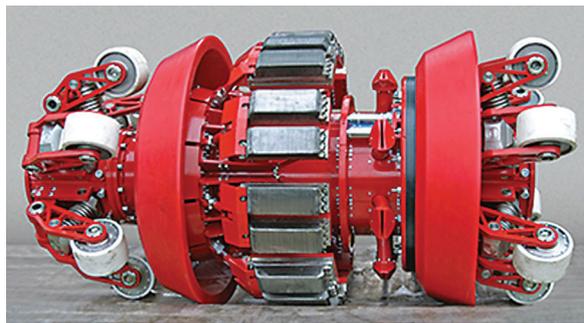


Рис. 4. Снаряд-дефектоскоп для диагностики технического состояния подводных переходов газо- и нефтепроводов [12]

Fig. 4. Projectile-flaw detector for diagnosing the technical condition of underwater crossings of gas and oil pipelines [12]

ния сети за счет встроенных в него систем неразрушающего контроля (чаще магнитного или ультразвукового типов). В работе [47] описан положительный опыт эксплуатации интеллектуальных поршней компании Rosen Group (Швейцария) для внутренней инспекции газопровода «Северный поток». Снаряды-дефектоскопы могут применяться комплексно со снарядами-скребками (поршнями), предназначенными для очистки внутренней поверхности трубопровода в целях повышения качества последующей процедуры дефектоскопии (рис. 5) [48, 49].

Для введения снарядов во внутреннее пространство подводного трубопровода предусматриваются специальные камеры приема-запуска стационарной установки (рис. 6) [12, 49]. Камера состоит из следующих элементов: рабочей трубы, опорной рамы, трубопроводной арматуры, запорного механизма, присоединительного устройства, элементов управления, устройства для заправки поршней (снарядов), датчика прохождения поршня (снаряда) [50].

За последние десять лет положительно зарекомендовали себя в области диагностики подводных переходов роботизированные аппараты отечественного производства (компании «Подводная робототехника») — «Гном» (на малых глубинах) и «Пилигрим» (на больших глубинах). Инструкция по оценке дефектов Р Газпром 2-2.3-594-2011⁷ предполагает удобную систему критериев оценки технического состояния подводных газопроводов, благодаря которой все дефекты, зафиксированные в отчете по результатам обследования, можно ранжировать. На основании общего ранжирования делается вывод о необходимости дополнительных обследований, сроках и порядке ремонта отдельных участков сети.

По данным исследования [51] в настоящее время в мире эксплуатируется более 100 тыс. км морских переходов трубопроводов. Процедура комплексной диагностики дюкеров через морские преграды име-

⁷ Р Газпром 2-2.3-594-2011. Критерии оценки технического состояния и рекомендации по проведению технического обслуживания подводных переходов трубопроводов ОАО «Газпром». М. : ОАО «Газпром», 2011.

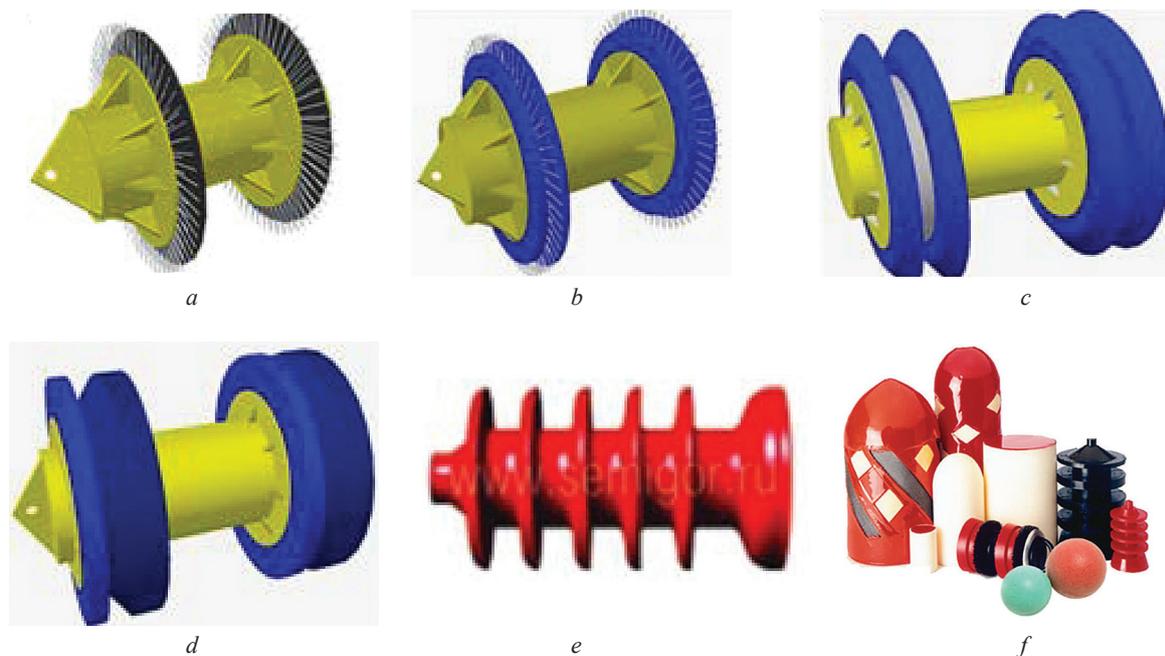


Рис. 5. Поршни (снаряды) для прочистки подводных трубопроводов [49]: *a* — поршень стальной «Ерш»; *b* — поршень полиуретановый с чистящими щетками; *c* — поршень полиуретановый с манжетами; *d* — поршень комбинированный манжетно-дисковый; *e* — поршень стальной цельнолитой; *f* — снаряды прочистные

Fig. 5. Pistons for cleaning underwater pipelines [49]: *a* — steel piston “Ruff”; *b* — polyurethane piston with cleaning brushes; *c* — polyurethane piston with cuffs; *d* — combined cuff-disc piston; *e* — solid steel piston; *f* — clean-up projectiles

ет ряд отличий в сравнении с диагностикой речных переходов [52]. Соленая морская вода существенно ограничивает возможность применения электромагнитных трассоискателей в целях определения точного расположения трубопровода. Гидроакустическая аппаратура также может давать нестабильные результаты ввиду наличия термоклинов — слоев воды с резким изменением температуры. Ввиду обозначенного для диагностики переходов трубопроводов через морские преграды специалистами рекомендуются вариации различного диагностического оборудования, а также увеличение числа водолазных спусков.

Для диагностических обследований морских переходов трубопроводов находят активное применение подводные технические аппараты [12, 53, 54]:

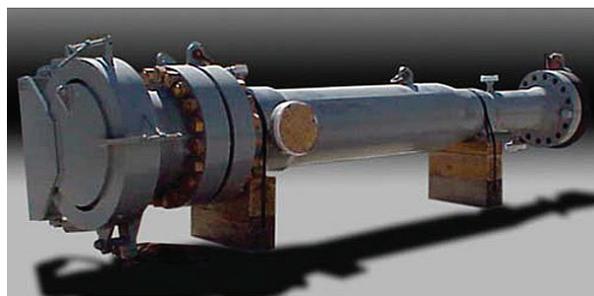


Рис. 6. Камера приема-запуска внутритрубных диагностических снарядов [50]

Fig. 6. Chamber for receiving and launching in-tube diagnostic projectiles [50]

- необитаемые подводные аппараты (НПА) — автономные, буксируемые, привязные (АНПА, БНПА, ПНПА соответственно);
- самоходные обитаемые подводные аппараты;
- жесткие нормобарические скафандры;
- глубоководные водолазные комплексы.

Обследование с применением АНПА выполняется в следующей последовательности: судном аппарат доставляется к месту проведения работ, спускается на дно, после чего он самостоятельно определяет точное месторасположение трубопроводной сети и движется в нужном направлении. АНПА выполняет фото- и видеосъемку, методами неразрушающего контроля диагностирует состояние сети. Принцип выполнения работ с использованием БНПА аналогичен, за исключением того, что самостоятельно данные подводные аппараты не перемещаются, их передвижение осуществляется судном. ПНПА применяют для точечных обследований, уточнения отдельных параметров технического состояния подводного трубопровода [12]. Лидерами среди российских производителей подводных аппаратов и робототехнических комплексов являются: ФГБУН «Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук», АО «НПП ПТ «Океанос», ООО «ПТЦ «Ровбилдер», АО «Тетис Про», ООО «Индэл-Партнер», АО «ЦКБ МТ «РУБИН» [55]. Виды движения подводных аппаратов относительно диагностируемой трубопроводной сети подразделяются на прямолинейные (аппарат идет параллельно оси трубопровода; применяется в случаях,

Табл. 3. Основные характеристики телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов

Table 3. Main characteristics of remote-controlled uninhabited underwater devices

Наименование прибора Name of the device	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
AC-ROV 100		<p>Предназначен для морских и пресных водоемов; рассчитан на погружение до 100 м; имеет пять степеней свободы перемещения, дистанционное управление джойстиком; оснащен цветной видеокамерой, светильниками, влагозащищенным монитором, глубиномером, датчиками температуры, влажности, системой наложения текстовой информации на видеозображение и функцией триммирования перемещения</p> <p>It is designed for sea and fresh water bodies; it is designed for diving up to 100 m; it has five degrees of freedom of movement; it has a remote control with a joystick; it is equipped with a colour video camera, lamps, a moisture-proof monitor, a depth gauge, temperature and humidity sensors, a system for superimposing text information on a video image and a function for trimming movement</p>
AC-ROV 3000		<p>Рассчитан на погружение до 3000 м; имеет пять степеней свободы перемещения; остальные характеристики аналогичны п. 1</p> <p>It is designed for diving up to 3000 m; it has five stages of freedom of movement; and other characteristics are similar to point 1</p>
Chinook и SteelHead		<p>Предназначен для морских и пресных водоемов; рассчитан на погружение до 300 м (SteelHead) и 600 м (Chinook); удобен для монтажа дополнительного навесного оборудования; возможность использования в труднодоступных местах; снабжен компасом; остальные характеристики аналогичны п. 1</p> <p>It is designed for sea and fresh water bodies; it is designed for diving up to 300 m (SteelHead) and 600 m (Chinook); it is convenient for mounting additional attachments; it can be used in hard-to-reach places; it is equipped with a compass; other characteristics are similar to point 1</p>
Марлин-350 Marlin-350		<p>Предназначен для поисковых, смотровых и аварийных работ; рассчитан на глубину погружения до 350 м; оснащен гидролокатором кругового обзора, многолучевым гидролокатором, цветной видеокамерой и системой освещения; управление посредством кабеля; сектор сканирования 360°; поставляется с ручной лебедкой для подъема/спуска</p> <p>It is designed for search, inspection and emergency operations; it is designed for a diving depth of up to 350 m; it is equipped with all-round sonar, multi-beam sonar, colour video camera and lighting system; cable control; 360° scanning sector; it comes with a manual winch for lifting/lowering</p>

Наименование прибора Name of the device	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
<p>Сабфайтер 3000 и Сабфайтер 4500 Subfighter 3000 and Subfighter 4500</p>		<p>Предназначен для глубин до 300 м (Сабфайтер 3000) и до 700 м (Сабфайтер 4500); осуществляет батиметрическое, гидроакустическое и визуальное обследование участков морского дна, сбор образцов донного грунта, осмотр элементов конструкций и трубопроводов, измерение толщины стенок и проведение дефектоскопии подводных объектов; оснащен цветной видеокамерой, глубиномером, системой освещения и магнитным компасом</p> <p>It is designed for depths up to 300 m (Subfighter 3000) and up to 700 m (Subfighter 4500); it performs bathymetric, hydroacoustic and visual inspection of the seabed, collecting samples of bottom soil, inspection of structural elements and pipelines, measuring wall thickness and conducting flaw detection of underwater objects; it is equipped with a colour video camera, depth gauge, lighting system and magnetic compass</p>
<p>Фалкон и Фалкон 1000 Falcon, Falcon 1000</p>		<p>Предназначен для глубин до 300 м (Фалкон) и 1000 м (Фалкон 1000); снабжен гидроакустическим оборудованием, видео- и фотокамерой, системой освещения, ультразвуковым толщиномером, зачистными устройствами; управление посредством кабеля; поставляется с электрической лебедкой для подъема/спуска</p> <p>It is designed for depths up to 300 m (Falcon) and 1000 m (Falcon 1000); it is equipped with hydroacoustic equipment, video and photo camera, lighting system, ultrasonic thickness gauge, stripping devices; cable control; supplied with an electric winch for lifting/lowering</p>
<p>I-90</p>		<p>Предназначен для глубин до 1000 м; оснащен гидролокатором кругового обзора, цветной видеокамерой, системой освещения, системой гидроакустического позиционирования; управление посредством кабеля</p> <p>It is designed for depths up to 1000 m; it is equipped with all-round sonar, colour video camera, lighting system, sonar positioning system; cable control</p>
<p>Атом Atom</p>		<p>Предназначен для глубин до 4000 м; выполняет подводно-технические работы и изыскания в сложных гидрологических условиях; снабжен гидроакустическими приборами, гидравлическим инструментом, цветной видеокамерой, системами освещения, спуско-подъемным устройством</p> <p>It is designed for depths up to 4000 m; it performs underwater technical work and surveys in difficult hydrological conditions; it is equipped with hydroacoustic devices, hydraulic tools, colour video camera, lighting systems, descent and lifting device</p>

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Наименование прибора Name of the device	Фото Photo	Описание Description
1	2	3
Квазар Quasar		<p>Оснащен гидравлическим движительно-рулевым комплексом для работы при сильных течениях; остальные характеристики аналогичны п. 9 It is equipped with a hydraulic propulsion and steering system for operation in strong currents; other characteristics are similar to point 9</p>
Квантум Quantum		<p>Оснащен мощной бортовой гидравлической станцией для подключения большого количества различного гидравлического инструмента; остальные характеристики аналогичны п. 9 It is equipped with a powerful on-board hydraulic station for connecting a large number of different hydraulic tools; the other characteristics are similar to point 9</p>

когда известно расположение трубопровода) и зигзагообразные (траектория движения аппарата представляет собой ломанную линию, многократно пересекающую ось трубопровода; применяется в случаях, когда расположение трубопровода точно неизвестно) [56]. В табл. 3 представлено краткое описание основных характеристик АНПА, предлагаемых компанией АО «Тетис Про» (Россия, г. Москва).

Использование НПА при эксплуатации подводных трубопроводов обуславливает следующие преимущества [47, 57]:

- неограниченные глубина и время использования;
- быстрое погружение к месту обследования, быстрое возвращение на поверхность;
- относительно невысокая стоимость;
- малая чувствительность к изменениям условий окружающей среды;

- значительное улучшение условий труда водолазов;

- простота устройства.

Неотъемлемым мероприятием на протяжении всего срока эксплуатации подводных переходов трубопроводов является мониторинг русловых процессов. Размыв дна водного объекта способствует оголению трубопроводов, возникновению напряженно-деформационных состояний [58, 59], превышающих расчетные значения, разрушению изоляционного покрытия и, как следствие, преждевременной коррозии труб и трещинообразованию [60–62]. Ученые [63, 64] отмечают, что особенной остротой проблема русловых процессов характеризуется в отношении слабоустойчивых русел рек с интенсивными поперечными и вертикальными деформациями. Так, размывы дна таких объектов могут за год достигать нескольких метров, а размывы поймы и берегов — десятков метров. На морских переходах

отмечаются не менее интенсивные размывы. Комплексная диагностика русловых процессов должна включать геодезические, гидрографические работы, анализ архивных данных для прогнозирования деформаций русла. Широкое распространение на объектах ПАО «Газпром» для обследования дна получили гидроакустические локаторы SWATHplus и Starfish (Великобритания). Эффективным методом изучения русловых процессов является космическая съемка [63], позволяющая отслеживать макроформы русла, направления паводковых вод.

В работе [65] предлагаются расчетные формулы (основаны на теории вероятности), позволяющие по расходу воды в реке установить уровень размыва дна и вероятность оголения подводного перехода. Данный косвенный метод состояния трубопроводной сети способствует значительному экономическому эффекту, поскольку дает возможность применять инструментальную диагностику лишь в случае вероятностного наличия размывов. Для автоматизированного моделирования и долгосрочного прогнозирования русловых процессов в настоящее время также широко используется программное обеспечение российского (STREAM 2D [66], Unicom_Pro, CARDINAL) и зарубежного (Mike 11, Mike 21, HEC-RAS, Delft 3D, Flo-2D) производства.

Исследователями [67] проведено математическое обоснование определения максимально допустимой величины перекрытия русла подводным переходом трубопровода с ненормативной глубиной залегания. Данный вопрос имеет значительную актуальность в отношении ремонтных работ на подводных участках трубопроводов, не предполагающих их большее заглубление под уровень дна в целях защиты от размыва грунта. Поскольку в рассматриваемом случае организуется каменная отсыпка трубопроводной сети, установка бетонных утяжелителей или гибких матов, которые неизбежно влекут за собой перекрытие живого сечения водотока, важно выполнять прогноз негативных последствий для водного объекта. Нормативные документы в области подво-

дных переходов магистральных нефтепроводов устанавливают предельное значение перекрытия живого сечения водотока, составляющее 10 %. Если предполагается перекрытие более установленного значения, необходимо изыскивать прочие варианты укрепления перехода (в частности, выполнить переукладку сети). Однако, по мнению специалистов ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», степень перекрытия живого сечения водотока должна устанавливаться с учетом типа водного объекта и его гидрологических характеристик. С этой целью необходимо прогнозное определение следующих показателей водного объекта: скорость течения воды в створе подводного перехода, длина водоворотной зоны в нижнем бьефе за конструкцией перехода, высота подъема воды перед подпором, ледовый режим водотока (риск образования шугозажоров, заторов льда). В результате проведенных исследований была получена математическая модель [67], описывающая зависимость максимально допустимой величины перекрытия живого сечения водотока от перечисленных выше факторов влияния. Так, установлено, что в отдельных случаях может быть допущено превышение 10%-ного ограничения по перекрытию без каких-либо негативных последствий для водного объекта (размыв русла и дна, затопление местности, закупорка живого сечения потока шугой).

Существующие способы ремонта подводных переходов можно классифицировать следующим образом.

В зависимости от работоспособности трубопроводной сети:

- с прерыванием транспортирования среды;
- без прерывания транспортирования среды.

В зависимости от степени автоматизации процесса:

- с участием водолазов;
- с использованием труда водолазов и специальной техники;
- с использованием техники, располагаемой над горизонтом воды;

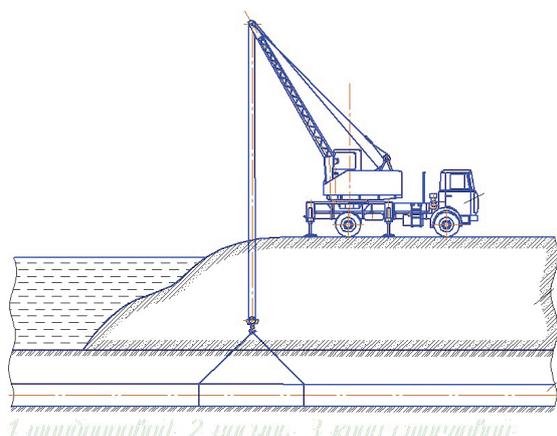


Рис. 7. Стреловой кран при установке на берегу (слева); плавучий кран (справа) [68]

Fig. 7. Boom crane for installation on shore (on the left); floating crane (on the right) [68]



Рис. 8. Понтонный мост для размещения стрелового крана [68]

Fig. 8. Pontoon bridge for placing a boom crane [68]

- с применением погружных технических устройств.

В публикациях [68–70] рассмотрена спецтехника, располагаемая над горизонтом воды при проведении ремонтных работ на подводных переходах трубопроводов: стреловые самоходные краны (могут располагаться на берегу, насыпи, барже, плавучих понтонах), плавучие краны (рис. 7). В отдельных случаях для осуществления ремонтных работ принимается решение о необходимости возведения понтонного моста к месту ремонта (рис. 8). При этом большая часть денежных средств, выделенных для ремонта перехода, тратится именно на постройку такого моста.

Для проведения аварийно-восстановительных и ремонтно-монтажных работ на переходах трубопроводов через водные преграды различной глубины находят применение плавательные мастерские российского производства [68], а также несамоходные плавательные средства (понтон) ПГМ-300 и ПГМ-300М (рис. 9), предназначенные для доставки водолазного оборудования к месту проведения работ, оборудованные кранами или лебедками для подъема и спуска тяжелых грузов.

ОАО «Подводгазэнергосервис» разработан и внедрен в практику ремонта подводных трубопроводов коннекторный соединитель [28]. При помощи данного устройства можно состыковать концы труб

(существующий и заменяющий демонтированный участок) с отклонением до 10° . Проблема актуальна при большой протяженности заменяемого участка трубопроводной сети.

Широкое распространение для восстановления поврежденной антикоррозийной изоляции на участках подводных переходов трубопроводов получила система Sea Shield 2000 HD (производства компании Premier Coatings Ltd., Великобритания). Антикоррозийная система предполагает нанесение трех слоев на сталь, эксплуатируемую под водой или в зоне переменного смачивания: грунтовки-праймера, петролатумной ленты, защитного кожуха. Грунтовка-праймер и петролатумная лента полностью блокируют проникновение кислорода и воды к металлу, предотвращая его коррозию, а защитный кожух защищает сталь от механических повреждений и биообрастаний. Антикоррозийная система Sea Shield 2000 HD предполагает возможность нанесения под водой.

Основной сложностью при ремонте подводных трубопроводов является процесс демонтажа и последующей установки утяжелителей (рис. 10, 11), применяемых для баллаستировки подводного перехода трубопровода при траншейном способе строительства, масса единицы которых может достигать 6 т [68].

За последние десять лет значительный прогресс наблюдается в сфере технологий подводной сварки, применяемой для монтажа и ремонта подводных переходов трубопроводов. К числу новейших отечественных разработок можно отнести: технологию гипербарической сварки с локальным осушением [71], метод использования порошковой проволоки с наноструктурированным покрытием [72–74], применение синтетических минеральных сплавов с введением таких элементов, как бор, алюминий, кремний, марганец и хром, которые обладают высокой катионной активностью и, как результат, не вызывают гидратации и повышения содержания диффузного водорода в сварных соединениях [75]. В работах [76, 77] описан положительный опыт использования сварочного автомата для подводной дуговой сварки (в том числе на больших глубинах), который осуществляет все действия под управлени-

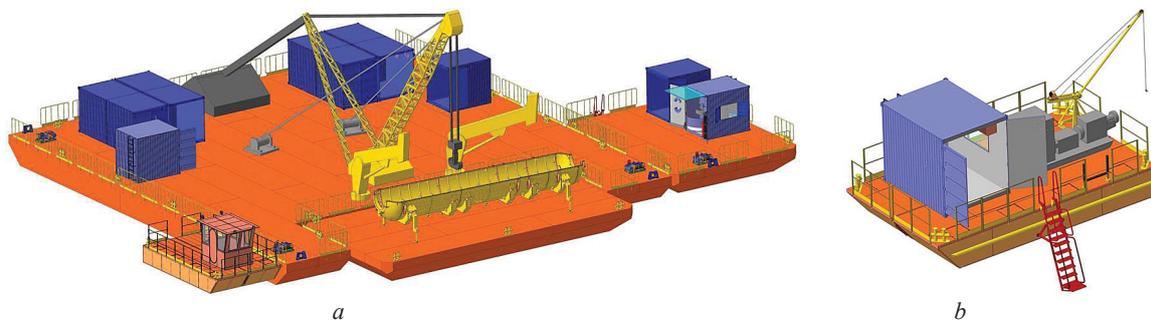


Рис. 9. Плавательная мастерская (а) и несамоходное плавсредство ПГМ-300М (b) для ремонта подводных переходов трубопроводов [68]

Fig. 9. Swimming workshop (a) and PG-300M non-self-propelled watercraft (b) for the repair of underwater crossings of the pipelines [68]

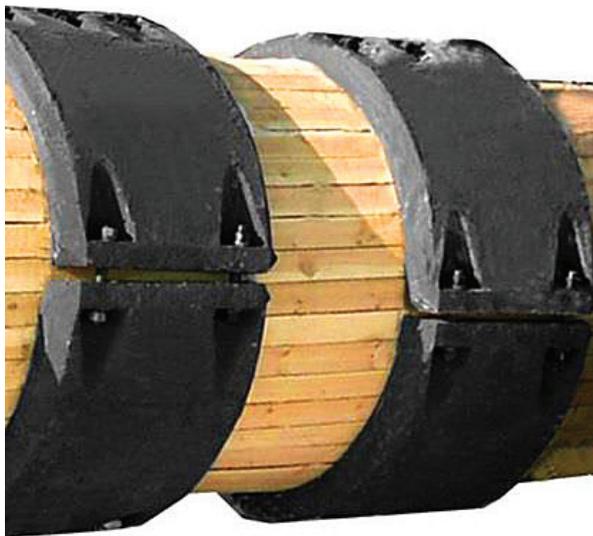


Рис. 10. Утяжелитель кольцевой чугунный для подводного перехода трубопровода [68]

Fig. 10. Cast-iron weighting device for underwater crossing of the pipeline [68]

ем компьютера. Все перечисленные разработки уже сегодня находят широкое практическое применение, способствуя облегчению труда сварщиков-водолазов, повышению стабильности процесса подводной сварки и качества сварных соединений [78, 79].

Работы по проведению капитального ремонта и реконструкции подводных газопроводов регламентируются рядом ведомственных стандартов (СТО Газпром 2-2.3-231-2008⁸, СТО Газпром 063-2009⁹). Проект капитального ремонта подводных переходов газопроводов выполняется на основании следующих показателей, устанавливаемых на этапе комплексной диагностики: заглубление подводного трубопровода, состояние антикоррозионной изоляции, состояние балластировки трубопровода, толщина стенки трубо-

⁸ СТО Газпром 2-2.3-231-2008. Правила производства работ при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром».

⁹ СТО Газпром 063-2009. Разграничение видов работ по принадлежности к реконструкции или капитальному ремонту. М. : ОАО «Газпром», 2009.



Рис. 11. Железобетонные утяжелители для подводного перехода трубопровода [68]

Fig. 11. Concrete weighting device for underwater crossing of the pipelines [68]

провода, наличие мест утечки газа, состояние береговых укреплений трубопроводной сети и береговых информационных знаков. В стоимость капитального ремонта обязательно должны входить затраты, направленные на устранение негативных последствий проведения работ по отношению к окружающей природной среде [80]. При этом специалистами отмечается, что несоблюдение сроков капитального ремонта, обозначенных в проекте, значительно удорожает стоимость производства работ: как правило, проект производства работ выполняется на определенный сезон, что выражается в стоимости доставки материалов и оборудования, монтажа, эксплуатации определенных машин и механизмов.

Методы ремонта подводных переходов нефтепроводов регламентируются отраслевым руководящим документом РД 153-39.4-067-00¹⁰. В работе [81] отмечается, что сроки, качество и стоимость работ по проведению капитального ремонта подводных нефтепроводов напрямую зависят от объема внедрения современных технологий в производственный процесс. К числу наиболее перспективных из них в настоящее время можно отнести технологии применения самогерметизирующихся зажимов и ремонтных герметизирующих камер.

До появления самогерметизирующихся зажимов FurmaSeal (рис. 12) компании Furmanite (Азербайджан) все виды ремонтных муфт (хомутов) использовались как временная мера поддержания безаварийной работы дефектных участков трубопроводов до производства капитального ремонта сети. Зажимы FurmaSeal применяются как постоянное устройство для устранения утечек транспортируемой среды через дефекты трубы, рассчитаны для труб диаметром от 700 до 1400 мм, рабочее давление от 2,5 до 35 МПа. Конструкция и порядок монтажа подробно описаны в работе [81].

В труде [51] предлагается ремонтная муфта, состоящая из гильзы, герметизатора и композитного состава (рис. 13). Муфта может быть установлена на трубопровод автоматизированно, т.е. в дистанционном режиме при использовании погружного блока ремонтного комплекса (рис. 14). Монтаж ремонтной муфты производится в два этапа — подготовительный и основной. На подготовительном этапе размывается грунт для доступа к участку трубы, очищается поверхность трубы, удаляется изоляционное покрытие. Основной этап предполагает установку ремонтной муфты, осуществляемую в следующей последовательности: на трубу устанавливается гильза, поверх гильзы размещается герметизатор, который образует рабочий объем муфты; в пространство между гильзой и герметизатором подается композитный состав. После затвердевания

¹⁰ РД 153-39.4-067-00. Методы ремонта дефектных участков действующих магистральных нефтепроводов. М. : ОАО «Транснефть», 2004.

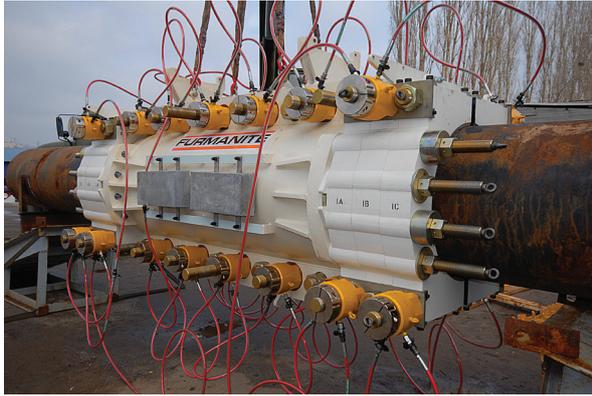


Рис. 12. Фото ремонтного самогерметизирующегося зажима FurmaSeal

Fig. 12. Photo of the repair self-sealing clip FurmaSeal

композитного состава ремонтный блок отстыковывается от места проведения работ и возвращается на судно. Стоимость установки одной ремонтной муфты согласно технико-экономическому обоснованию, выполненному авторами [51], составляет от 9 до 15 тыс. долл. в зависимости от диаметра ремонтируемой трубопроводной сети, а также глубины перехода относительно водной поверхности. Отмечается, что описываемый способ ремонта трубопровода с применением погружного ремонтного блока значительно дешевле методов, осуществляемых с привлечением водолазов.

В вопросах производства работ по установке зажимов, восстановлению изоляции, ремонту сварных швов подводных газо- и нефтепроводов находят широкое применение передовые отечественные разработки — ремонтные герметизирующие камеры (кессоны) (ТУ 6010.100.003, завод «Ротор», г. Камышин). Устройство представляет собой цилиндрический стальной ремонтный комплекс, оснащенный системами жизнеобеспечения рабочих (вентиляцией, освещением, дренажем), и позволяет

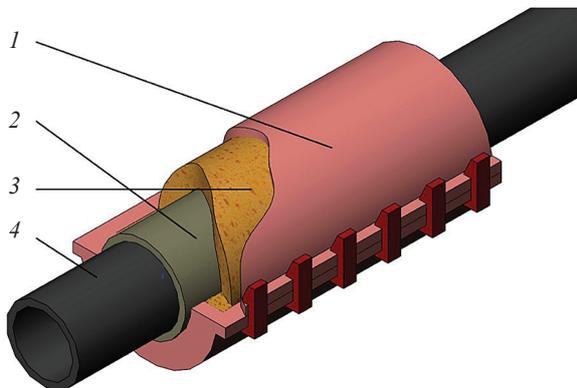


Рис. 13. Принципиальная конструкция ремонтной муфты: 1 — герметизатор; 2 — гильза; 3 — композитный состав; 4 — труба [51]

Fig. 13. The basic design of the repair clutch: 1 — hermetic; 2 — sawn-off pipe; 3 — composite material; 4 — pipe [51]

проводить ремонтные работы теми же способами, что и на поверхности (рис. 15). Герметизирующие камеры предназначены для ремонта труб номинальным диаметром от 300 до 1400 мм, рассчитаны на погружение до 14 м. Недостатком описываемого метода является необходимость выключения из работы трубопроводной сети и последующее ее опорожнение от транспортируемой среды (что в случае с нефтепроводами сопряжено с рядом трудностей). В работе [82] определено и проанализировано напряженно-деформированное состояние кессона, погруженного на дно водного объекта, в результате чего даны обоснованные рекомендации по усовершенствованию конструкции камеры (увеличение толщины стенок, оснащение конструкции ребрами жесткости) в целях возможности ее применения на больших глубинах (более 14 м, заявляемых производителем).



Рис. 14. Погружной блок ремонтного комплекса [51]

Fig. 14. Submerged block of the repair facility [51]

Аналог описываемой выше герметизирующей камеры — комплекс для ремонта подводных трубопроводов [83]. Авторы полезной модели отмечают удобство ее использования для случаев необходимости вырезки дефектного участка трубы и последующей установки нового с использованием сварки. Ремонтный комплекс снабжен системами вентиляции, освещения, телевидения и связи, сварочным оборудованием и пневмоинструментом.

В работе [84] установлены и проанализированы расчетные напряжения сварных соединений дюкера нефтепровода через р. Лена. Сделан вывод о негативном влиянии циклического нагружения трубопровода, возникающего в результате отключений (по эксплуатационным и техническим причинам) насосной станции. Циклические нагружения способствуют образованию трещин двух видов: трещины, распространяющиеся от сварного соединения вдоль образующей трубы (скорость их продольного роста значительно превосходит скорость роста по толщине стенки трубы), и трещины, распространяющиеся от сварного соединения по толщине металла (приводят к образованию свищей).

Мелкие ремонтные (в том числе сварочные) работы на переходах трубопроводов через морские преграды (на глубинах до 300 м) чаще осуществля-

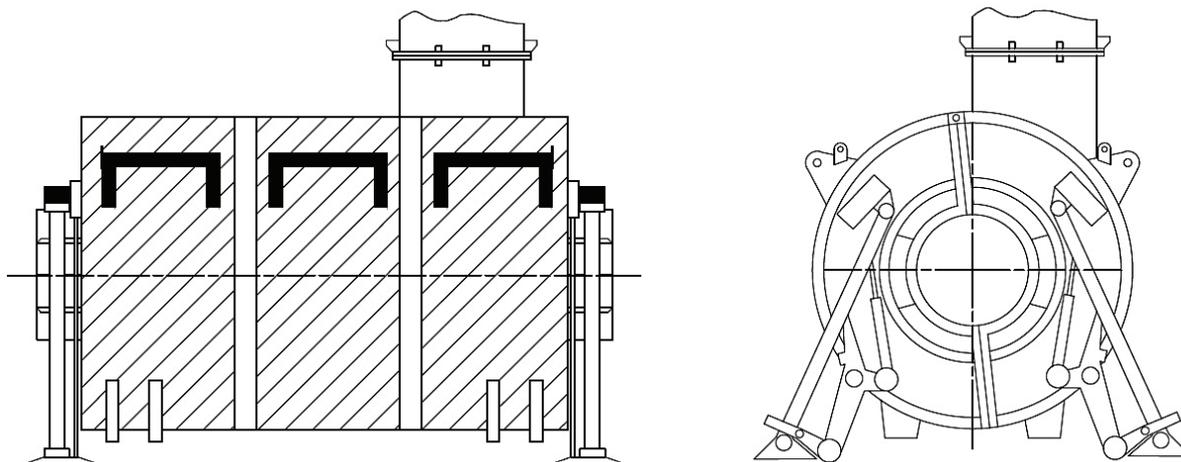


Рис. 15. Схема ремонтной герметизирующей камеры [81]

Fig. 15. Scheme of the repair hermetic chamber [81]

ются водолазами без использования подводных аппаратов. Для продолжительных, трудоемких работ на больших глубинах задействуются обитаемые или необитаемые подводные аппараты, которые могут быть оснащены гидромониторами, фрезами для разработки грунта. В публикации [12] описан положительный опыт эксплуатации обитаемой подводной камеры UWHC-1 (рис. 16) компании Veolia Environmental Services (Франция) для диагностических и ремонтных работ.

В исследовании [85] отмечен положительный опыт эксплуатации дистанционно управляемой системы ремонта переходов трубопроводов через морские преграды SIRCoS (рис. 17) компании Saiprem-Subsub (Италия). Система снабжена ремонтными компонентами (режущими инструментами, инструментами для удаления антикоррозионного и бетонного покрытия), запрессовочным устройством (трубомонтажный компонент), способна работать на глубинах до 2200 м, предназначена для труб диаметром до 1200 мм с толщиной стенки до 40 мм.



Рис. 16. Камера UWHC-1 компании Veolia Environmental Services (Франция) для ремонта подводных переходов трубопроводов [12]

Fig. 16. UWHC-1 camera of Veolia Environmental Services (France) for repair of underwater crossings of the pipeline [12]

Система может функционировать без присутствия водолазов, в том числе в неблагоприятных условиях (нулевая видимость, наклонное дно). Применение системы рекомендовано европейской нормативно-технической документацией в области подводного ремонта трубопроводов (Recommended Practice DNV RP-F113. Pipeline subsea repair; Offshore Standard DNV OS-F101. Submarine pipeline system).

Инженерами компании «ГеоЛайнПроект» и АО «ЦНИИ «Курс»» разработана электронная модель комплекса для ремонта подводных переходов [1], включающая три сегмента: комплекс средств управления и транспортирования, комплекс средств диагностического обследования и монтажа, ремонтный блок. При помощи специальных программных компонентов электронный макет был анимирован, что позволило наглядно представить процесс ремонта, отследить перемещения составных элементов комплекса в рабочей зоне. Практической ценностью электронной модели ремонтного комплекса является справочная информация по функционированию основных механизмов, их ограничениям, способов совершенствования, компоновке основных элементов комплекса на предполагаемой рабочей зоне (с ее индивидуальной топографией).

Не менее значимы в вопросах капитального ремонта подводных переходов технологии демонтажа существующих трубопроводов. В настоящее время на территории Российской Федерации действует стандарт ОСТ 153-39.4-027-2002¹¹ в отношении демонтажа линейной части магистральных нефтепроводов, пересекающих водные преграды протяженностью не более 25 м. Нормативно-техническая документация, регламентирующая демонтаж дюкеров водопровода, канализации, газопровода, а также нефтепроводов, пересекающих водные преграды

¹¹ ОСТ 153-39.4-027-2002. Технология демонтажа линейной части магистральных нефтепроводов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804275.htm>

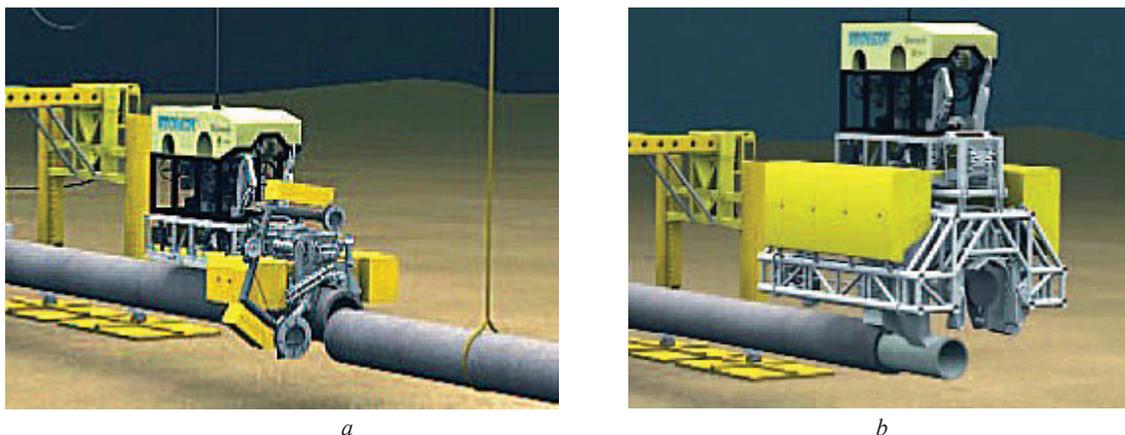


Рис. 17. Дистанционно управляемая система ремонта переходов трубопроводов через морские преграды SIRCoS: *a* — изображение процесса резки трубы; *b* — изображение процесса удаления бетонного покрытия трубы [85]

Fig. 17. Remote-controlled system for repairing pipeline crossings over sea barriers SIRCoS: *a* — image of the process of cutting the pipe; *b* — image of the process of removing the concrete coating of the pipe [85]

протяженностью более 25 м, отсутствует. Также отсутствует и сметно-нормативная база, определяющая стоимость работ по демонтажу (консервации) подводных переходов. В целом, согласно исследованию [86], полной замене подводные трубопроводы подлежат в том случае, если они отвечают хотя бы одному из приведенных критериев:

- наличие дефектов, устранение которых не может быть выполнено фрагментарно или с использованием временных ремонтных средств, либо перечисленные методы нецелесообразны с экономической точки зрения;
- несоответствие толщины стенки трубопровода расчетному значению, нормируемому СП 36.13330.2012¹²;
- наличие провисов и оголений, устранить которые невозможно отсыпкой грунта.

Необходимость демонтажа подводных трубопроводов также может возникнуть в результате морального старения сети, изменения направления потока транспортируемой среды, изменения экономической политики (что особенно актуально в отношении газо- и нефтепроводов) [87]. Вполне рациональным решением в перечисленных случаях может стать повторное использование демонтированных труб (после проведения процедур ремонта и восстановления) на других объектах трубопроводного транспорта. Специалистами [87] разработана технологическая схема демонтажа подводных трубопроводов (нефти и газа) и ремонтно-восстановительных работ в целях их повторного использования, включающая следующие этапы:

1) инспекция трубопровода (основной целью является определение расположения трубопровода, его технического состояния);

¹² СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103173>

2) расчистка трассы от обваловки и вскрытие трубопровода (трубопроводы, заглубленные под уровень дна водоема, освобождаются от окружающего их грунта методом вымывания; трубопроводы, проложенные по дну без заглубления, освобождаются от железобетонных утяжелителей и балластировочных матов);

3) водолазное обследование и предупредительный ремонт (производится в целях выявления участков, на которых может произойти разрушение стенок трубы и, как следствие, утечка углеводородов; при обнаружении таких участков устанавливаются временные металлические муфты [88]);

4) очистка внутренних стенок трубопровода от транспортируемой среды (на данном этапе применяются скребки, поршни, оснащенные приборами контроля; очистка продолжается до тех пор, пока контрольный поршень после прохождения через трубопроводную сеть не будет иметь загрязнений на своем корпусе) [89];

5) демонтажно-подъемные работы (способ демонтажа и подъема выбирается исходя из параметров трубы — диаметр, длина, техническое состояние);

6) резка труб и укладка в штабеля (зависит от способа демонтажа, резка выполняется труборезными машинами на барже или на берегу);

7) транспортировка демонтированных труб (осуществляется с применением барж, буксировочных понтонов, наземного транспорта);

8) комплексное обследование труб (выполняется визуально-измерительный контроль, неразрушающий контроль);

9) отбраковка труб (проводится в соответствии с требованиями ОСТ 153-39.4-027-2002¹¹; в отдельных случаях требуется дополнительное лабораторное исследование образцов труб; по результатам данного этапа определяется возможная об-

ласть повторного использования демонтированных труб);

10) производство ремонтно-восстановительных работ (этап предполагает сварочные работы по устранению повреждений стенок труб, работы по восстановлению изоляции);

11) транспортировка восстановленных труб на новые объекты.

Повторное использование бывших в эксплуатации подводных труб является мерой защиты окружающей среды, имеет значительный ресурсосберегающий и, как результат, экономический эффект [90, 91].

Демонтаж подводных переходов нефтепроводов (пересекающих водные преграды протяженностью до 25 м) осуществляется согласно ОСТ 153-39.4-027-2002¹¹ в зависимости от способа прокладки трубопровода. Трубопроводы, проложенные траншейным методом, могут быть извлечены:

- способом протаскивания трубопровода по дну подводной траншеи;
- способом подъема трубопровода плавкраном на плавучую площадку.

Трубопроводы, проложенные тоннельным способом, демонтируются методом протаскивания (всего участка или отдельных плетей, полученных после нарезки сети на секции). Переходы нефтепроводов, проложенных методом наклонно-направленного бурения, не могут быть демонтированы ввиду большой глубины заложения труб. Патентом РФ [92] защищен способ демонтажа подводных трубопроводов без вскрытия грунта, отличающийся от аналогов простотой реализации, возможностью применения при любых видах грунтов, слагающих дно водного объекта. Кроме того, способ позволяет исключить деформацию извлекаемых труб, которые могут быть использованы повторно для строительства прочих объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного обзорного исследования способов и средств диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов можно сформулировать следующие выводы:

1. Подводные переходы трубопроводов относятся к одним из самых ответственных участков трубопроводных сетей, их строительство должно осуществляться под строгим контролем, поскольку последующее устранение ошибок является дорогостоящим мероприятием. Комплексная диагностика — неотъемлемый элемент процесса эксплуатации подводных переходов трубопроводов, способствующий увеличению срока их службы, предупреждению аварий, природоохранным мерам.

2. На сегодняшний день на территории РФ нормативно-техническая документация, регламентирующая процедуру комплексной диагностики подво-

дных водопроводных и канализационных дюкеров, отсутствует.

3. Порядок комплексной диагностики подводных газо- и нефтепроводов, а также ее отдельных видов работ, регламентируется актуальными стандартами и руководящими документами.

4. Комплексная диагностика подводных переходов трубопроводов может быть классифицирована на внешнюю и внутреннюю. Внешняя предполагает определение местоположения трубопровода, осмотр его поверхности (визуальный или с применением простых измерительных средств), приборное обследование поверхности трубопровода и изоляции, мониторинг русловых процессов. Внутренняя диагностика осуществляется посредством проникновения во внутреннее пространство трубопровода приборов и аппаратов с целью определения его технического состояния.

5. Обследование поверхности и внутреннего пространства подводных переходов трубопроводов выполняется неразрушающими методами контроля: магнитографическими, ультразвуковыми, электромагнитными, радиографическими.

6. Наибольшую применимость в вопросах обнаружения утечек из подводных переходов трубопроводов имеют следующие методы: оптические, акустические, химические, физические.

7. Последовательность внутритрубной диагностики подводных переходов газо- и нефтепроводов регламентируется отраслевой нормативно-технической документацией и включает следующие этапы: прочистка полости диагностируемого участка до заданной степени чистоты, пропуск снаряда-профилемера, пропуск снаряда-дефектоскопа, экспресс-анализ полученной информации, пропуск стресс-коррозионного снаряда, общий анализ диагностического обследования, подготовка отчета об обследовании.

8. В целях получения сведений о геоморфологических особенностях рельефа дна, геологии грунтов, местоположении дюкеров, размывших участках трубопроводной сети используется высокоточное оборудование: многолучевые и узколучевые эхолоты, гидроакустические (ультразвуковые) профилографы, гидролокаторы бокового и кругового обзора, спутниковые навигационные системы. Выбор конкретного оборудования определяется глубиной заложения перехода, глубиной водного объекта и характеристикой грунтов, слагающих его дно. В отдельных случаях требуется одновременное использование нескольких видов оборудования.

9. Процедура комплексной диагностики подводных переходов трубопроводов через морские преграды отличается особой сложностью, поскольку гидроакустическая и электромагнитная аппаратуры в морской воде работают нестабильно ввиду высокой концентрации солей и наличия термоклиннов в водной толще. Широкое применение для об-

следования таких переходов находят подводные технические аппараты: необитаемые (автономные, буксируемые, привязные), самоходные обитаемые, нормобарические скафандры, глубоководные водолазные комплексы.

10. Мониторинг русловых процессов является неотъемлемым мероприятием на протяжении всего срока эксплуатации подводных переходов трубопроводов. Комплексная диагностика русловых процессов включает геодезические, гидрографические работы, анализ архивных данных для прогнозирования деформаций русла. Для автоматизированного моделирования и долгосрочного прогнозирования русловых процессов в настоящее время широко используется программное обеспечение российского и зарубежного производства.

11. В целом способы и средства диагностики подводных переходов трубопроводов определяются следующими параметрами: длиной перехода, пересекающей водную преграду; глубиной прокладки трубопроводной сети относительно поверхности воды; параметрами транспортируемой среды (давлением); материалом трубопровода; гидрологическими характеристиками водного объекта.

12. Работы по проведению ремонта (мелкого или капитального) подводных переходов газопроводов и нефтепроводов регламентируются отраслевыми стандартами организаций и руководящими документами. Отдельная нормативно-техническая документация в отношении ремонта подводных дюкеров водоснабжения и водоотведения не установлена в настоящее время на территории РФ.

13. Ремонт подводных переходов трубопроводов может осуществляться с привлечением водолазов и (или) специальной техники: стреловых и плавучих кранов, плавательных мастерских, погружных ремонтных комплексов (обитаемых и необитаемых), кессонов.

14. Процесс демонтажа подводных переходов нефтепроводов через водные преграды длиной до 25 м на территории РФ регламентируется отраслевым стандартом. Документация, регламентирующая демонтаж (консервацию) дюкеров водопроводов, канализации, газопроводов, а также нефтепроводов, пересекающих водные преграды протяженностью более 25 м, отсутствует.

15. Необходимость демонтажа подводных переходов трубопроводов может возникнуть в связи с окончанием расчетного срока эксплуатации системы, предусмотренного проектом; наличием дефектов трубопроводной сети, устранить которые фрагментарно невозможно или нерационально с точки зрения технико-экономического обоснования; моральным старением перехода; изменением направления транспортировки среды; изменением экономической политики.

16. Демонтаж подводных переходов, проложенных траншейным методом, осуществляется методом протаскивания трубопроводных плетей по дну водного объекта или подъема разрезанных труб плавкраном; демонтаж подводных переходов, проложенных тоннельным способом, проводится методом протаскивания трубопроводных плетей; переходы, проложенные методом наклонно-направленного бурения, чаще всего консервируют, поскольку глубина заложения и сложность геометрии таких труб не позволяет осуществить демонтаж.

17. В отдельных случаях может быть принято решение о повторном использовании демонтированных труб для строительства прочих (менее ответственных) трубопроводных систем, при этом технология процесса демонтажа имеет ряд существенных отличий. В целом повторное использование бывших в эксплуатации подводных трубопроводов имеет значительный ресурсосберегающий эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко Е.Ю., Деменко А.О. Электронный макет автоматизированного ремонтного комплекса для подводных переходов магистральных трубопроводов и визуализация его эксплуатационного применения // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2017. № 1 (10). С. 10–19.

2. Abdallah M. Offshore Structures (Second Edition): Design, Construction and Maintenance. United Kingdom : Gulf Professional Publishing, 2020. 649 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-816191-3.00003-1

3. Bai Yo., Bai Q. Subsea Engineering Handbook. Second Edition. United Kingdom : Gulf Professional Publishing, 2020. 940 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-812622-6.00021-X

4. Li X., Chen G., Chang Yu., Xu C. Risk-based operation safety analysis during maintenance activities

of subsea pipelines // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 122. Pp. 247–262. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.006

5. Yang Q., Sun M., He M., Yang Q. Evolution features of riverbeds near underwater crossing line pipes: An experimental study // Natural Gas Industry B. 2020. Vol. 7. Pp. 246–253. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.10.006

6. Li X., Yang M., Chen G. An integrated framework for subsea pipelines safety analysis considering causation dependencies // Ocean Engineering. 2019. Vol. 183. Pp. 175–186. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.064

7. Sun Yu., Cao X., Liang F. Investigation on underwater spreading characteristics and migration law of oil leakage from damaged submarine pipelines // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 127. Pp. 329–347. DOI: 10.1016/j.psep.2019.05.030

8. Zhu H., You J., Zhao H. Underwater spreading and surface drifting of oil spilled from a submarine pipeline under the combined action of wave and current // *Applied Ocean Research*. 2017. Vol. 64. Pp. 217–235. DOI: 10.1016/j.apor.2017.03.007
9. Zhang J., He H., Yang S. Plume dynamics and dispersion characteristics in oil horizontal release from damaged submarine pipeline // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 28. Pp. 1214–1224. DOI: 10.1016/j.cjche.2020.03.004
10. Могутин Ю.Б., Гусева О.А., Веселова А.В., Власьев М.В. Организация подводных сервисных работ на морских нефтегазовых месторождениях // *Судостроение*. 2017. № 3 (832). С. 25–31.
11. Chaturvedi S.K., Basu S., Banerjee S. Gimbal orientation study and assessment for the autonomous underwater vehicles // *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020. Vol. 5. Pp. 101–115. DOI: 10.1016/j.joes.2019.09.003
12. Могутин Ю.Б., Гусева О.А., Веселова А.В., Власьев М.В. Организация подводных сервисных работ на морских нефтегазовых месторождениях // *Судостроение*. 2017. № 4 (833). С. 27–33.
13. Chen L., Arzaghi E., Mahdi M., Garaniya V., Abbassi R. Condition monitoring of subsea pipelines considering stress observation and structural deterioration // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 51. Pp. 178–185. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.006
14. Davis P., Brockhurst J. Subsea pipeline infrastructure monitoring: A framework for technology review and selection // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 104. Pp. 540–548. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.025
15. Bao Ch., Hao H., Lia Z. X. Integrated ARMA model method for damage detection of subsea pipeline system // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 48. Pp. 176–192. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.025
16. Zvirko O., Tsyrlunyk O., Nykyforchyn H. Non-destructive evaluation of operated pipeline steel state taking into account degradation stage // *Procedia Structural Integrity* 2020. Vol. 26. Pp. 219–224. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.025
17. Bhadran V., Shukla A., Karki H. Non-contact flaw detection and condition monitoring of subsurface metallic pipelines using magnetometric method // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 28. Pp. 860–864. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.313
18. Golikov N.I. Effect of Residual Stress on the Destruction of Field Joints of Gas Pipelines Operating in Conditions of the North // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 20. Pp. 161–166. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.133
19. Ивлиев Е.А. Обнаружение, отслеживание и обследование подводных трубопроводов и кабелей электромагнитными методами // *Подводные исследования и робототехника*. 2009. № 2 (8). С. 22–33.
20. Yang Q., Sun M., He M., Yang Q. Evolution features of riverbeds near underwater crossing line pipes: An experimental study // *Natural Gas Industry B*. 2020. Vol. 7. Pp. 246–253. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.10.006
21. Патент № 2499951 РФ. Способ обнаружения слабоинтенсивных утечек из подводных нефтепроводов мобильным подводным измерительным комплексом / Горбачкий В.В., Иванов В.Г., Литвин А.Д., Скопин Н.А.; заявл. № 2011138735/06 от 22.09.2011; опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33. 6 с.
22. Verde C., Molina L., Carrera R. Practical Issues of Leaks Diagnosis in Pipelines // *IFAC Proceedings Volumes*. 2011. Vol. 44. Issue 1. Pp. 12337–12342. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01688
23. Mahmutoglu Y., Turk K. Positioning of leakages in underwater natural gas pipelines for time-varying multipath environment // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 207. P. 107454. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107454
24. Lu H., Iseley T., Behbahani S., Fu L. Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Vol. 98. P. 103249. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103249
25. Халыев Н.Х. Капитальный ремонт линейной части магистральных газонефтепроводов: учебное пособие. М. : Макс Пресс, 2011. 448 с.
26. Мариненко Е.Е. Газоснабжение: учебное пособие. Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. 222 с.
27. Пашилов М.В. Мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации морского подводного трубопровода Варандейского нефтеотгрузочного терминала // *Новая наука: современное состояние и пути развития*. 2015. № 5. С. 155–158.
28. Гайдукевич С.В., Никоненко А.Д., Шалагин В.Н. Техническое обслуживание речных и морских переходов трубопроводов ОАО «Газпром». Анализ состояния и предложения по развитию // *Территория НЕФТЕГАЗ*. 2013. № 11. С. 86–91.
29. Патент № 2611560 РФ. Способ оценки технического состояния подводных коммуникаций и устройство для его реализации / Гайдукевич С.В., Мамонтов Ю.М., Симонов А.В., Никоненко А.Д., Цветков Ю.В., Шалагин В.Н.; заявл. № 2015131705 от 30.07.2015; опубл. 28.02.2017. Бюл. № 7. 16 с.
30. Вальщиков И.Л. «Wavemaker» — длинноволновая ультразвуковая система для диагностики и мониторинга трубопроводов // *Экспозиция Нефть Газ*. 2015. № 5 (44). С. 81–83.
31. Патент № 2019617183 РФ. Программа для ЭВМ. Информационная система «Учет и анализ технического состояния подводных переходов трубопроводов «Дюкер 2.0»: заявл. № 2019617183 от 18.04.2019; опубл. 04.06.2019. Бюл. № 6. 1 с.
32. Кудряшов С.П., Гайдукевич С.В. Диагностика подводных переходов магистральных газопроводов ПАО «Газпром» // *Газовая промышленность*. 2018. № S3 (778). С. 88–89.

33. *Атрощенко А.А., Жуков Г.Д., Жуков И.Г.* Диагностика и защита подводных переходов магистральных трубопроводов от размыва // Территория НЕФТЕГАЗ. 2013. № 11. С. 94–95.
34. *Султанов Р.Г., Мустафин Ф.М., Мугаллимов Ф.М., Ишмуратов Т.А., Каримов Л.З.* Метод определения места утечки подводного трубопровода с футляром и места негерметичности футляра // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 4 (106). С. 93–101.
35. *Wang B., Scott A., Socolofsky C., Adams E., Boufadel M.C.* Behavior and dynamics of bubble breakup in gas pipeline leaks and accidental subsea oil well blowouts // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 131. Part A. Pp. 72–86. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.03.053
36. *Chen Q., Xing X., Jin C., Zuo L., Wu J., Wang W.* A novel method for transient leakage flow rate calculation of gas transmission pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 77. Pp. 103261. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103261
37. Патент № 2560728 РФ. Устройство для защиты водной среды от загрязнений, возникающих в результате утечек перекачиваемого продукта нефтяного происхождения из подводного трубопровода / *Паутов В.И.*; заявл. № 20141309/13 от 25.07.2014; опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23. 23 с.
38. Патент № 2511873 РФ. Способ определения координат места порыва подводного трубопровода / *Каримов М.Ф., Каримова Р.М., Лобанов А., и др.*; заявл. № 2012148235/06 от 12.11.2012; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10. 21 с.
39. *Wang P., Chi C., Jiuyan L., Huang H.* Improving performance of three-dimensional imaging sonars through deconvolution // *Applied Acoustics*. 2021. Vol. 175. P. 107812. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107812
40. *Tang Z., Lu J., Wang Z., Ma G.* Three dimensional height information reconstruction based on mobile active sonar detection // *Applied Acoustics*. 2020. Vol. 169. Pp. 107459. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107459
41. *Joe H., Kim J., Yu S.-Ch.* Sensor Fusion-based 3D Reconstruction by Two Sonar Devices for Seabed Mapping // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. Issue 21. Pp. 169–174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.302
42. *Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Struchkova G.P.* Safety assessment of oil and gas pipelines using satellite information // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 20. Pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.144
43. Методика и технические средства приборного геофизического обследования подводных переходов трубопроводов // Группа Сервисных Предприятий «МОРИНЖГЕОЛОГИЯ». Член Российского Союза Нефтегазостроителей. URL: http://www.morinzhgeologia.ru/download/Obsl_podvodn_perehodov.pdf
44. *Крапивский Е.И., Пахотин П.А.* Обоснование технологий дистанционного электромагнитного диагностирования подводных переходов нефте- и газопроводов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 5. С. 260–264.
45. *Титова Ю.С., Мирошниченко Т.А., Тайленкунова А.С., Кудрешов Н.Н.* Диагностика состояния магистральных газопроводов, проходящих через водные преграды // *Вестник научных конференций*. 2019. № 4–2 (44). С. 110–115.
46. *Дмитриевский Н.Н., Никифоров С.Л., Аняньев Р.А.* Опыт акустического зондирования трасс подводных газопроводов в акваториях морей и руслах рек // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: тр. Всерос. конф.* М., 2016. № 13. С. 262–264.
47. *Буссузу У.Д.* Проблемы создания подводных систем контроля за состоянием морских трубопроводов // *Вестник науки и образования*. 2019. № 2–2 (56). С. 93–100.
48. *Alnaim F., Ziauddin M.* Wax deposition and prediction in petroleum pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 184. Pp. 106385. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106385
49. Патент № 165236 РФ. Мобильная камера пуска/приема средств очистки и диагностики для трубопроводов / *Яшин С.А., Ярыжнов А.А., Моршинин В.В.*; заявл. № 2016102275/05 от 25.01.2016; опубл. 10.10.2016. Бюл. №3. 3 с.
50. *Дворников К.А., Михеев А.С., Кисарев В.Ю.* Подходы к созданию подводных систем очистки и диагностики трубопроводов // *Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования*. 2018. № 1 (18). С. 31–36.
51. *Борисовский Д.В., Козлов Д.Н., Серегина С.А.* К вопросу разработки средств автоматизированного оперативного ремонта подводных трубопроводов для доставки углеводородного сырья // *Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования*. 2017. № 2 (11). С. 13–18.
52. *Никоненко А.Д.* Особенности технического обслуживания подводных переходов. Безопасность труда в промышленности // *Безопасность труда в строительстве*. 2012. № 12. С. 31–36.
53. *Zhen X., Vinnem J.E., Han Y., Peng C., Yang X., Huang Y.* New risk control mechanism for innovative deepwater artificial seabed system through online risk monitoring system // *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 95. P. 102054. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102054
54. *Zhang H., Zhang S., Wang Y., Liu Yu., Yang Y., Zhou T. et al.* Subsea pipeline leak inspection by autonomous underwater vehicle // *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 107. Pp. 102321. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102321

55. Меркулов В.И. Основные направления и перспективы развития подводных робототехнических систем, применяемых в арктической зоне РФ // Комплексные исследования Арктики: сб. науч. тр. Междунар. симпозиума. СПб., 2017. С. 16–28.

56. Катышева М.В. Электромагнитное обследование подводных трубопроводов и кабелей подводным аппаратом // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2014. № 25. С. 125–129.

57. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения. Часть 2. Технология строительства. М. : Недра, 2007. 408 с.

58. Mirzaee-Sisan A., Wu G. Residual stress in pipeline girth welds- A review of recent data and modelling // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2019. Vol. 169. Pp. 142–152. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.004

59. Correa S.C.A., Souza E.M., Oliveira F., Silva X., Lopes R.T., Marinho C. et al. Assessment of weld thickness loss in offshore pipelines using computed radiography and computational modeling // Applied Radiation and Isotopes. 2009. Vol. 67. Issue 10. Pp. 1824–1828. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.05.015

60. Cheng A., Chen N.Z. An extended engineering critical assessment for corrosion fatigue of sub-sea pipeline steels // Engineering Failure Analysis. 2018. Vol. 84. Pp. 262–275. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.012

61. Danna M.R., Huysse L. The effect of inspection sizing uncertainty on the maximum corrosion growth in pipelines // Structural Safety. 2018. Vol. 70. Pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.10.005

62. Mirzaee-Sisan A., Wu G. Residual stress in pipeline girth welds- A review of recent data and modelling // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2019. Vol. 169. Pp. 142–152. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.004

63. Атрощенко А.А., Жуков Г.Д., Жуков И.Г. Диагностика и защита подводных переходов магистральных трубопроводов от размыва // Территория НЕФТЕГАЗ. 2013. № 11. С. 94–95.

64. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов. М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 704 с.

65. Пряхин В.Н., Ильинич О.В. Вероятностная оценка аварийной ситуации на подводных переходах газопроводов через реки // Мелиорация и водное хозяйство. 2012. № 6. С. 36–38.

66. Патент № 2017660266 РФ. Программный комплекс для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках: заявл. № 2017617252 от 21.07.2017; опублик. 20.09.2017. 1 с.

67. Груздева В.А., Устинов А.Ю., Сабайда Е.А. Определение допустимой величины перекрытия живого сечения водотока при ремонте участков трубопроводов с ненормативной глубиной залегания //

Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 5. С. 530–537.

68. Позынич К.П., Эунап Р.А., Позынич Е.К. Механизация ремонтных и сервисных работ на подводных переходах трубопроводов, закрепленных утяжелителями // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования: монография. Пенза : Наука и просвещение, 2019. С. 165–188.

69. Ионин А.А., Жила В.А., Артихович В.В., Пшоник М.Г. Газоснабжение: учебник для студентов вузов. М. : Изд-во АСВ, 2013. 472 с.

70. Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела: учебник для вузов. Уфа : ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. 528 с.

71. Хаустов Ю.А., Гецкин О.Б., Вышемирский Е.М., Полосков С.И. Оборудование и технологии механизированной сварки в мини-кессоне для ремонта подводных переходов магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. 2013. № 2. С. 52–57.

72. Паришин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С., Антипов И.С., Карпов В.М. Исследование порошковых проволок и сварных соединений при подводной механизированной сварке в водной среде // Сварка и диагностика. 2015. № 3. С. 49–54.

73. Barnabas S.G., Rajakarunakaran S., Pandian G.S., Buhari A.M.I., Muralidharan V. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding // Materials Today: Proceedings Available. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.725

74. Chen H., Guo N., Huang L., Zhang X., Feng J., Wang G. Effects of arc bubble behaviors and characteristics on droplet transfer in underwater wet welding using in-situ imaging method // Materials & Design. 2019. Vol. 170. P. 107696. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107696

75. Горынин И.В., Орыщенко А.С., Мальшевский В.А., Брусницын Ю.Д., Калинин В.Т., Николаев А.И. Гидроксильные группы в сварочных материалах, источники, последствия и предотвращение // Петраньевские чтения. «Сварочные материалы – 2015»: сб. докл. III Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конференции, Санкт-Петербург, 2015. С. 15–21.

76. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Максимов С.Ю., Полосков С.И. Совершенствование оборудования для подводной механизированной и автоматизированной сварки и резки порошковой проволокой // Сварка и диагностика. 2011. № 5. С. 54–59.

77. Владимиров А.В., Хабусов В.А., Лебедев В.А. и др. Универсальный источник питания для дуговой сварки и плазменной резки // Автоматическая сварка. 2011. № 1. С. 41–46.

78. Surojo E., Syah Putri E.D., Budiana E.P. Recent Developments on Underwater Welding of Metallic Material // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 27. Pp. 14–21. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.07.003

79. Ramirez Luna L.E., Queiroz Bracarense A., Pereira Pessoa E. C., Costa P.S., Guerrero G.A., Sa-

las Reyes A.E. Effect of the welding angle on the porosity of underwater wet welds performed in overhead position at different simulated depths // *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. P. 117114. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117114

80. Попов А.Ю. Эффективность методов ремонта подводных переходов магистральных газопроводов // *Территория НЕФТЕГАЗ*. 2012. № 8. С. 64–67.

81. Сим А.Д., Жарков Н.С. Анализ методов ремонта подводного перехода магистрального нефтепровода с применением современных технологий и решений // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2019. Т. 1. № 1. С. 349–354.

82. Маскаленко С.С., Сим А.Д. Анализ напряженного состояния кессона при ремонте дюкера // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2019. Т. 1. № 3. С. 75–79.

83. Патент № 2481438 РФ. Подводный комплекс для ремонта подводных трубопроводов / Селиверстов С.М., Сосновский С.В., Смирнов А.М., Севостьянов С.П.; заявл. № 2011112972/03 от 05.04.2011; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13. 11 с.

84. Аммосов А.П., Яковлев Ю.А., Корнилова З.Г. Прогноз длительной прочности сварных соединений стыков труб дюкера ППМН ВСТО-1 через р. Лена // *Наука и образование*. 2017. № 1 (85). С. 81–87.

85. Фаббри С., Каваллини Ф., Джоло Р., Спинелли К.М. Система SIRCoS: ремонт трубопроводов на глубинах ниже уровня погружения водолазов // *Научно-технический сборник: вести газовой науки*. 2015. № 2 (22). С. 82–91.

86. Вафин Д.Р., Шаталов Д.А., Шаманин А.П. Критерии выбора технологии демонтажа подводных переходов магистральных трубопроводов // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2019. № 3 (79). С. 70–77.

87. Муртизаев М.Ю., Халлыев Н.Х., Гумеров А.К. Методология повышения эффективности производства ремонтно-строительных работ подводных промышленных трубопроводов, бывших в эксплуатации // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 2 (104). С. 74–83.

88. Патент № 2287105 РФ. Муфта для ремонта подводного трубопровода / Пасхин В.В., Воронин В.Н. и др.; заявл. № 2004138695/06 от 29.12.2004; опубл. 10.11.2006. Бюл. № 31. 12 с.

89. Syed M.M., Lemma T.A., Vandurangi S.K., Ofei T.N. Recent developments in model-based fault detection and diagnostics of gas pipelines under transient conditions // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 83. P. 103550. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103550

90. Муртизаев М.Ю. Управление качеством строительно-монтажных работ при строительстве морских трубопроводов на мелководье // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2015. № 3 (101). С. 135–139.

91. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Жилин А.В. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: учебное пособие. Томск : Издательство ТПУ, 2008. 238 с.

92. Патент № 2565118 РФ. Способ демонтажа магистрального трубопровода / Валеев А.Х., Фоменко Н.М.; заявл. № 2014104073/06 от 05.02.2014; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. 9 с.

Поступила в редакцию 29 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 1 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 22 сентября 2021 г.

Об авторе: **Юлия Александровна Рыльцева** — кандидат технических наук, преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

REFERENCES

1. Glushko E.Yu., Demchenko A.O. Electronic layout of an automated repair complex for underwater crossings of main pipelines and visualization of its operational application. *Problems of development of ship armament and ship radio-electronic equipment*. 2017; 1(10):10-19. (rus.).

2. Abdallah M. *Offshore Structures (Second Edition): Design, Construction and Maintenance*. United Kingdom, Gulf Professional Publishing, 2020; 649. DOI: 10.1016/B978-0-12-816191-3.00003-1

3. Bai Yo., Bai Q. *Subsea Engineering Handbook. Second Edition*. United Kingdom, Gulf Professional Publishing, 2020; 940. DOI: 10.1016/B978-0-12-812622-6.00021-X

4. Li X., Chen G., Chang Yu., Xu C. Risk-based operation safety analysis during maintenance activities of subsea pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 122:247-262. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.006

5. Yang Q., Sun M., He M., Yang Q. Evolution features of riverbeds near underwater crossing line

pipes: An experimental study. *Natural Gas Industry B*. 2020; 7:246-253. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.10.006

6. Li X., Yang M., Chen G. An integrated framework for subsea pipelines safety analysis considering causation dependencies. *Ocean Engineering*. 2019; 183:175-186. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.064

7. Sun Yu., Cao X., Liang F. Investigation on underwater spreading characteristics and migration law of oil leakage from damaged submarine pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 127:329-347. DOI: 10.1016/j.psep.2019.05.030

8. Zhu H., You J., Zhao H. Underwater spreading and surface drifting of oil spilled from a submarine pipeline under the combined action of wave and current. *Applied Ocean Research*. 2017; 64:217-235. DOI: 10.1016/j.apor.2017.03.007

9. Zhang J., He H., Yang S. Plume dynamics and dispersion characteristics in oil horizontal release from damaged submarine pipeline. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2020; 28:1214-1224. DOI: 10.1016/j.cjche.2020.03.004

10. Mogutin Yu.B., Guseva O.A., Veselova A.V., Vlasyev M.V. Organization of underwater service operations at sea oil and gas fields. *Shipbuilding*. 2017; 3(832):25-31. (rus.).

11. Chaturvedi S.K., Basu S., Banerjee S. Gimbal orientation study and assessment for the autonomous underwater vehicles. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020; 5:101-115. DOI: 10.1016/j.joes.2019.09.003

12. Mogutin Yu.B., Guseva O.A., Veselova A.V., Vlasyev M.V. Organization of underwater service operations at sea oil and gas fields. *Shipbuilding*. 2017; 4(833):27-33. (rus.).

13. Chen L., Arzaghi E., Mahdi M., Garaniya V., Abbassi R. Condition monitoring of subsea pipelines considering stress observation and structural deterioration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 51:178-185. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.006

14. Davis P., Brockhurst J. Subsea pipeline infrastructure monitoring: A framework for technology review and selection. *Ocean Engineering*. 2015; 104:540-548. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.025

15. Bao C., Hao H., Lia Z.X. Integrated ARMA model method for damage detection of subsea pipeline system. *Engineering Structures*. 2013; 48:176-192. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.025

16. Zvirko O., Tsyruhnyk O., Nykyforchyn H. Non-destructive evaluation of operated pipeline steel state taking into account degradation stage. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 26:219-224. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.025

17. Bhadrans V., Shukla A., Karki H. Non-contact flaw detection and condition monitoring of subsurface metallic pipelines using magnetometric method. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 28:860-864. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.313

18. Golikov N.I. Effect of Residual Stress on the Destruction of Field Joints of Gas Pipelines Operating in Conditions of the North. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 20:161-166. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.133

19. Ivliev E. A. Detection, tracking and inspection of underwater pipelines and cables by electromagnetic methods. *Underwater research and robotics*. 2009; 2(8):22-33. (rus.).

20. Yang Q., Sun M., He M., Yang Q. Evolution features of riverbeds near underwater crossing line pipes: An experimental study. *Natural Gas Industry B*. 2020; 7:246-253. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.10.006

21. Patent No. 2499951 RU. *Detection method of low-intense leaks from underwater oil lines by means of mobile underwater measuring complex* / Gorbatskij V.V., Ivanov V.G., Litvin A.D., Skopin N.A.; application No. 2011138735/06 22.09.2011; Publ. 27.11.2013. Bul. No. 33; 6. (rus.).

22. Verde C., Molina L., Carrera R. Practical Issues of Leaks Diagnosis in Pipelines. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011; 44(1):12337-12342. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01688

23. Mahmutoglu Y., Turk K. Positioning of leakages in underwater natural gas pipelines for time-varying multipath environment. *Ocean Engineering*. 2020; 207:107454. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107454

24. Lu H., Iseley T., Behbahani S., Fu L. Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 98:103249. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103249

25. Hallyev N.H. *Overhaul of the linear part of the main gas and oil pipelines*. Moscow, Maks Press, 2011; 448. (rus.).

26. Marinenko E.E. *Gas supply*. Volgograd, VolgGASU, 2008; 222. (rus.).

27. Pashilov M.V. Activities to ensure the safe use safe service of an underwater marine pipeline Varandey Oil loading terminal. *New Science: the current condition and ways of development*. 2015; 5:155-158. (rus.).

28. Gajdukevich S.V., Nikonenko A.D., Shalagin V.N. Maintenance service of river and sea crossings of Gazprom pipelines. Analysis of situation and development. *The territory of NEFTEGAZ*. 2013; 11:86-91. (rus.).

29. Patent No. 2611560 RU. *Method of evaluating technical state of underwater communications and device therefor* / Gaidukevich S.V., Mamontov Yu.M., Simonov A.V., Nikonenko A.D., Tsvetkov Yu.V., Shalagin V.N.; application No. 2015131705 30.07.2015; publ. 28.02.2017. Bul. No. 7. 16 p. (rus.).

30. Valyshkov I. L. "Wavemaker" — long-wave ultrasonic system for diagnostics and monitoring of pipelines. *Exposition Neft Gaz*. 2015; 5(44):81-83. (rus.).

31. Patent No. 2019617183 RU. *Computer program. Information system «Accounting and analysis of the technical condition of underwater crossings*

- of pipelines «Duker 2.0»; application No. 2019617183 18.04.2019; publ. 04.06.2019. Bul. No. 6; 1. (rus.).
32. Kudryashov S.P., Gaidukevich S.V. Diagnostics of underwater transitions of the main gas pipelines of Gazprom. *Gas industry*. 2018; S3(778):88-89. (rus.).
33. Atroschenko A.A., Zhukov G.D., Zhukov I.G. Diagnostics and protection of underwater crossings of main pipelines from erosion. *The territory of NEFTEGAZ*. 2013; 11:94-95. (rus.).
34. Sultanov R. G., Mustafin F. M., Mugallimov F. M., Ishmuratov T. A., Karimov L. Z. Method for detecting the location of a leak in an underwater pipeline with a case and the location of a leak in the case. *Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products*. 2016; 4(106):93-101. (rus.).
35. Wang B., Scott A., Socolofsky C., Adams E., Boufadel M.C. Behavior and dynamics of bubble breakup in gas pipeline leaks and accidental subsea oil well blowouts. *Marine Pollution Bulletin*. 2018; 131(Part A):72-86. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.03.053
36. Chen Q., Xing X., Jin C., Zuo L., Wu J., Wang W. A novel method for transient leakage flow rate calculation of gas transmission pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020; 77:103261. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103261
37. Patent No. 2560728 RU. *Device for protecting the aquatic environment from pollution resulting from leaks of the pumped petroleum product of petroleum origin from the underwater pipeline* / Pautov V.I.; application No. 20141309/13 25.07.2014; publ. 20.08.2015. Bul. No. 23; 23. (rus.).
38. Patent No. 2511873 RU. *Method for determining the place of damage of an underwater pipeline* / Karimov M.F., Karimova R.M., Lobanov A.N. et al.; application No. 2012148235/06 12.11.2012; publ. 10.04.2014. Bul. No. 10; 21. (rus.).
39. Wang P., Chi C., Jiyuan L., Huang H. Improving performance of three-dimensional imaging sonars through deconvolution. *Applied Acoustics*. 2021; 175:107812. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107812
40. Tang Z., Lu J., Wang Z., Ma G. Three dimensional height information reconstruction based on mobile active sonar detection. *Applied Acoustics*. 2020; 169:107459. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107459
41. Joe H., Kim J., Yu S.-Ch. Sensor Fusion-based 3D Reconstruction by Two Sonar Devices for Seabed Mapping. *IFAC-PapersOnLine*. 2019; 52(21):169-174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.302
42. Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Struchkova G.P. Safety assessment of oil and gas pipelines using satellite information. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 20:230-235. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.144
43. *Methodology and technical means of the instrument geophysical survey of underwater pipeline crossings*. Group of Service Enterprises “MORINZHGEOLOGIA”. Member of the Russian Union of Oil and Gas Builders. URL: http://www.morinzhgeologia.ru/download/Obsl_podvodn_perehodov.pdf (rus.).
44. Krapivskiy E.I., Pakhotin P.A. Substantiation of technologies for remote electromagnetic diagnostics of underwater transitions of oil and gas pipelines. *Mountain information and analytical bulletin*. 2013; 5:260-264. (rus.).
45. Titova YU.S., Miroshnichenko T.A., Tajlenkova A.S., Kudreshov N.N. Diagnostics of the condition of main gas pipelines passing through water barriers. *Bulletin of scientific conferences*. 2019; 4-2(44):110-115. (rus.).
46. Dmitrevskiy N.N., Nikiforov S.L., Ananiev R.A., Levchenko O.V., Meluzov A.A. Experience of acoustic sounding of underwater gas pipeline routes in the waters of the seas and rivers. *Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics: Proceedings of the All-Russian Conference*. Moscow, 2016; 13:262-264. (rus.).
47. Bussugu U.D. Problems of creating underwater systems for monitoring the condition of marine pipelines. *Bulletin of Science and Education*. 2019; 2-2(56):93-100.
48. Alnaim F., Ziauddin M. Wax deposition and prediction in petroleum pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; 184:106385. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106385
49. Patent No.165236 RU. *Mobile camera for starting / receiving cleaning and diagnostic tools for pipeline diagnostics* / Yashin S.A., Yaryzhnov A.A., Morshinin V.V.; application No. 2016102275/05 25.01.2016; publ. 10.10.2016. Bul. No. 3; 3. (rus.).
50. Dvornikov K.A., Miheev A.S., Kisarev V.Yu. Approaches to the creation of underwater systems for cleaning and diagnostics of pipelines. *Problems of development of ship armament and ship radio-electronic equipment*. 2018; 1(18):31-36. (rus.).
51. Borisovskij D.V., Kozlov D.N., Seregina S.A. On the issue of developing means of automated operational repair of underwater pipelines for the delivery of hydrocarbon raw materials. *Problems of development of ship armament and ship radio-electronic equipment*. 2017; 2(11):13-18. (rus.).
52. Nikonenko A.D. Features of maintenance of underwater crossings. *Labor safety in industry. Labor safety in construction*. 2012; 12:31-36. (rus.).
53. Zhen X., Vinnem J.E., Han Y., Peng C., Yang X., Huang Y. New risk control mechanism for innovative deepwater artificial seabed system through online risk monitoring system. *Applied Ocean Research*. 2020; 95:102054. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102054
54. Zhang H., Zhang S., Wang Y., Liu Yu., Yang Y., Zhou T. et al. Subsea pipeline leak inspection by autonomous underwater vehicle. *Applied Ocean Research*. 2021; 107:102321. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102321

55. Merkulov V.I. Main directions and perspectives of development of underwater robotic systems used in the Arctic zone of the Russian Federation. *Complex research of the Arctic: collection of scientific papers of the International Symposium*. St. Petersburg, 2017; 16-28. (rus.).
56. Katysheva M.V. Electromagnetic inspection of underwater pipelines and cables by an underwater device. *Intellectual potential of the XXI century: stages of knowledge*. 2014; 25:125-129. (rus.).
57. Borodavkin P.P. *Marine oil and gas facilities. Part 2. Technology of construction*. Moscow, Nedra, 2007; 408. (rus.).
58. Mirzaee-Sisan A., Wu G. Residual stress in pipeline girth welds- A review of recent data and modelling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019; 169:142-152. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.004
59. Correa S.C.A., Souza E.M., Oliveira F., Silva X., Lopes R.T., Marinho C. et al. Assessment of weld thickness loss in offshore pipelines using computed radiography and computational modeling. *Applied Radiation and Isotopes*. 2009; 67(10):1824-1828. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.05.015
60. Cheng A., Chen N.Z. An extended engineering critical assessment for corrosion fatigue of subsea pipeline steels. *Engineering Failure Analysis*. 2018; 84:262-275. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.012
61. Danna M.R., Huyseb L. The effect of inspection sizing uncertainty on the maximum corrosion growth in pipelines. *Structural Safety*. 2018; 70:71-81. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.10.005
62. Mirzaee-Sisan A., Wu G. Residual stress in pipeline girth welds- A review of recent data and modelling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019; 169:142-152. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.004
63. Atroshchenko A.A., Zhukov G.D., Zhukov I.G. Diagnostics and protection of underwater passages of main pipelines from washing out. *The territory of NEFTEGAZ*. 2013; 11:94-95. (rus.).
64. Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. *Wastewater disposal and treatment*. Moscow, Publishing House of the Association of Construction Universities; 2006; 704. (rus.).
65. Pryakhin V.N., Ilinich O.V. Probabilistic assessment of an emergency situation at underwater crossings of gas pipelines across rivers. *Melioration and water resources*. 2012; 6:36-38. (rus.).
66. Patent No. 2017660266 RU. *Complex for calculating currents, bottom deformations, and pollution transport in open streams*; application No. 2017617252 21.07.2017; publ. 20.09.2017. (rus.).
67. Gruzdeva V.A., Ustinov A.Y., Sabajda E.A. Calculation of the permissible value of the overlap of the cross-section of the watercourse when repairing sections of pipelines with an improper depth of occurrence. *Science and Technology of pipeline transport of oil and petroleum Products*. 2019; 9(5):530-537. (rus.).
68. Pozynich K.P., Eunap R.A., Pozynich E.K. *Mechanization of repair and service works on underwater pipeline crossings fixed with weighting devices. Innovative development: the potential of science and modern education: monograph*. Penza, Science and education, 2019; 165-188. (rus.).
69. Ionin A.A., Zhila V.A., Artihovich V.V., Pshonik M.G. *Gas supply*. Moscow, ASV Publishing House, 2013; 472. (rus.).
70. Korshak A.A., Shammazov A.M. *Fundamentals of oil and gas business*. Ufa, DizajnPoligrafServis, 2005; 528. (rus.).
71. Haustov Yu.A., Geckin O.B., Vyshemirskij E.M., Poloskov S.I. Equipment and technologies of mechanized welding in a mini-caisson for repair of underwater passages of main pipelines. *Welding works and diagnostics*. 2013; 2:52-57. (rus.).
72. Parshin S.G., Levchenko A.M., Majstro A.S., Antipov I.S., Karpov V.M. Investigation of powder wires and welded joints in underwater mechanized welding in a water environment. *Welding works and Diagnostics*. 2015; 3:49-54. (rus.).
73. Barnabas S.G., Rajakarunakaran S., Pandian G.S., Buhari A.M.I., Muralidharan V. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding. *Materials Today: Proceedings Available*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.725
74. Chen H., Guo N., Huang L., Zhang X., Feng J., Wang G. Effects of arc bubble behaviors and characteristics on droplet transfer in underwater wet welding using in-situ imaging method. *Materials & Design*. 2019; 170:107696. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107696
75. Gorynin I.V., Oryshchenko A.S., Malyshvsky V.A., Brusnitsyn Yu.D., Kalinnikov V.T., Nikolaev A.I. Hydroxyl groups in welding materials, sources, consequences and prevention. *Petranev's readings. "Welding materials-2015": collection of reports of the III St. Petersburg International Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, 2015; 15-21. (rus.).
76. Paton B.E., Lebedev V.A., Maksimov S.Yu., Poloskov S.I. Improvement of equipment for underwater mechanized and automated welding and cutting with cored wire. *Welding and Diagnostics*. 2011; 5: 54-59. (rus.).
77. Vladimirov A.V., Habuzov V.A., Lebedev V.A. et al. Universal power supply for arc welding and plasma cutting. *Automatic welding*. 2011; 1:41-46. (rus.).
78. Surojo E., Syah Putri E.D., Budiana E.P. Recent Developments on Underwater Welding of Metallic Material. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 27:14-21. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.07.003

79. Ramírez Luna L.E., Queiroz Bracarense A., Pereira Pessoa E.C., Costa P.S., Guerrero G.A., Salas Reyes A.E. Effect of the welding angle on the porosity of underwater wet welds performed in overhead position at different simulated depths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021; 117114. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117114
80. Popov A.Yu. Efficiency of methods of repair of underwater crossings of main gas pipelines. *Territory of NEFTEGAZ*. 2012; 8:64-67. (rus.).
81. Sim A.D., Zharkov N.S. Analysis of methods of repair of the underwater passage of the main oil pipeline with the use of modern technologies and solutions. *Far East: problems of development of the architectural and construction complex*. 2019; 1(1):349-354. (rus.).
82. Maskalenko S.S., Sim A.D. Analysis of the stressed state of the caisson during the repair of the duker. *Far East: problems of the development of the architectural and construction complex*. 2019; 1(3):75-79. (rus.).
83. Patent No. 2481438 RU. *Underwater complex for repair of underwater pipelines* / Seliverstov S.M., Sosnovskiy S.V., Smirnov A.M., Sevostyanov S.P.; application 2011112972/03 05.04.2011; publ. 10.05.2013. Bul. No. 13; 11. (rus.).
84. Ammosov A.P., Yakovlev U.A., Kornilova Z.G. The forecast of long-term strength of welded joints of pipes of a siphon of the underwater crossing of the oil pipeline ESPO VSTO-1 across the Lena river. *Science and Education*. 2017; 1(85):81-87. (rus.).
85. Fabbri S., Kavallini F., Dzholo R., Spinelli K.M. The Circus system: repair of pipelines at depths below the diving level of divers. *Scientific and technical collection: news of gas science*. 2015; 2(22):82-91. (rus.).
86. Vafin D.R., Shatalov D.A., Shamanin A.P. Criteria for selecting the technology for dismantling underwater crossings of main pipelines. *Science and technology in the gas industry*. 2019; 3(79):70-77. (rus.).
87. Matrizaev M.Yu., Khallyev N.Kh., Gumerov A.K. Methodology for improving the efficiency of production of repair and construction works of underwater field pipelines that were in operation. *Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products*. 2016; 2(104):74-83. (rus.).
88. Patent No. 2287105 RU. *Clutch for underwater pipeline repair* / Pashkin V.V., Voronin V.N. et al.; application No. 2004138695/06 29.12.2004; publ. 10.11.2006. Bul. No. 31; 12. (rus.).
89. Syed M.M., Lemma T.A., Vandurangi S.K., Ofei T.N. Recent developments in model-based fault detection and diagnostics of gas pipelines under transient conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020; 83:103550. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103550
90. Matrizaev M.Yu. Quality control of construction and installation works in the construction of marine pipelines in shallow water. *Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products*. 2015; 3(101):135-139. (rus.).
91. Rudachenko A.V., Chuhareva N.V., Zhilin A.V. *Design and operation of gas and oil pipelines*. Tomsk, TPU Publishing House, 2008; 238. (rus.).
92. Patent No. 2565118 RU. *Method of dismantling the main pipeline* / Valeev A.Kh., Fomenko N.M.; application No. 2014104073/06 05.02.2014; publ. 20.10.2015. Bul. No. 29; 9. (rus.).

Received March 29, 2021.

Adopted in revised form on September 1, 2021.

Approved for publication on September 22, 2021.

BIONOTES: **Yuliya A. Ryltseva** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Water Supply and Water Removal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов. Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Віonotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

