

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал  
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 10/2020  
Vol. 15 Issue 10/2020

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction  
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 10  
2020**

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

Сквозной номер 145

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 10  
2020**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	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.
<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Периодичность:</b>	12 раз в год
<b>Учредители:</b>	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.
<b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
<b>Издатель:</b>	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8. Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75. Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:ric@mgsu.ru">ric@mgsu.ru</a>
<b>Типография:</b>	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
<b>Сайт журнала:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a>
<b>Тел.:</b>	(499) 188-29-75
<b>Подписка и распространение:</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	26.10.2020.
<b>Подписан в свет</b>	30.10.2020.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,17. Тираж 100 экз. Заказ № 207

## Главный редактор

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

### Заместители главного редактора

*Евгений Валерьевич Королев*, проректор по учебно-методической работе, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

### Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Дмитрий Николаевич Силка**, профессор кафедры инвестиционно-строительного бизнеса, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

**Армен Завенович Тер-Мартirosян**, д-р техн. наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

### Редакция журнала

#### Выпускающий редактор

*Анна Александровна Дядичева*

#### Дизайн и верстка

*Александр Дмитриевич Федотов*

#### Редакторы

*Татьяна Владимировна Бердникова*

#### Перевод на английский язык

*Ольга Валерьевна Юденкова*

#### Корректор

*Любовь Владимировна Светличная*

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

## Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Павел Александрович Хаванов**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогасоснабжения 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 <sup>MGSU</sup>

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

<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Publication Frequency:</b>	Monthly
<b>Founders:</b>	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.
<b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b>	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
<b>Publisher:</b>	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: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:ric@mgsu.ru">ric@mgsu.ru</a>
<b>Printing House:</b>	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.
<b>Website journal:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a>
<b>Subscription:</b>	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
<b>Signed for printing:</b>	26.10.2020

Distributed by subscription

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

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

*Evgeniy V. Korolev*, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

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

## Editorial Board

**Piotr Banaszuk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

**Katarzyna Gladyszewska-Fiedoruk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

**Dmitry N. Silka**, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

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

**Josef Vichan**, University of Zilina, Slovak Republic

**Joost Walraven**, Delft University of Technology, Netherlands

**Zbigniew Wojcicki**, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

## Editorial team of issues

### Executive editor

*Anna A. Dyadicheva*

### Editors

*Tat'yana V. Berdnikova*

### Corrector

*Lyubov' V. Svetlichnaya*

### Layout

*Aleksandr D. Fedotov*

### Russian-English translation

*Ol'ga V. Yudenkova*

## Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

*А.Е. Балакина, И.С. Самылова*

**Реконструкция санаторного фонда Республики Крым с учетом оценки инвестиционной привлекательности . . . . .1353**

*А.И. Гиясов, Т.Б. Гиясов*

**Значение местных ветров в аэрации урбанизированных территорий с жарким штилевым условием климата . . . . .1363**

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

*А.З. Тер-Мартirosян, Е.С. Соболев*

**Исследования скорости поперечных волн в грунтоцементе при анизотропном напряженном состоянии. . . . .1372**

*М.Г. Плюснин, С.В. Цыбакин*

**Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии . . . . .1390**

*М.Н. Кирсанов*

**Analytical calculation of deformations of a truss for a long span covering (Аналитический расчет деформаций фермы пространственного покрытия) . . . . .1399**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*С.С. Иноземцев, До Тоан Чонг*

**Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов . . . . .1407**

## БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

*Фан Тхи Ан, И.С. Шукуров, Фам Ван Лыонг, Л.И. Шукурова*

**Исследование запыленности воздуха городской среды . . . . .1425**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*П.А. Журавлев, А.М. Марукян*

**Инженерная защита зданий, сооружений и территорий как фактор инновационного развития территориального планирования . . . . .1440**

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*В.С. Лагута, С.В. Калинин, В.Э. Кузнецов*

**Оценка возможности и целесообразности создания строительного РТК укладки газобетонных блоков . . . . .1450**

*М.А. Любарская, В.С. Чекалин, И.А. Бачуринская*

**Учет влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства . . . . .1461**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . .1473**

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Alevtina E. Balakina, Irina S. Samylova*

**Reconstruction of health centres in the Republic of Crimea with consideration of their investment attractiveness . . . . .1353**

*Adham I. Giyasov, Timur B. Giyasov*

**The importance of local winds for the aeration of urban areas having hot and windless climatic conditions. . . . .1363**

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

*Armen Z. Ter-Martirosyan, Evgeniy S. Sobolev*

**Studies of the shear wave velocity in soil cement under the anisotropic stress state. . . . .1372**

*Mikhail G. Plyusnin, Sergey V. Tsybakin*

**An experimental study on variability of deformation characteristics of concrete in compression . . . .1390**

*Mikhail N. Kirsanov*

**Analytical calculation of deformations of a truss for a long span covering. . . . .1399**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Sergei S. Inozemtcev, Toan Trong Do*

**Technology of self-healing road pavements: current status and development prospects . . . . .1407**

## SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

*Phan Thi An, Ilkhomzhon S. Shukurov, Pham Van Luong, Lola I. Shukurova*

**A study of the dust content in the air of the urban environment . . . . .1425**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Pavel A. Zhuravlev, Artur M. Marukyan*

**Engineering protection of buildings, structures and territories as a factor of innovative development of spatial planning. . . . .1440**

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

*Viktor S. Laguta, Sergei V. Kalinichenko, Vladimir E. Kuznecov*

**Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: feasibility and expediency assessment. . . . .1450**

*Maria A. Liubarskaia, Vadim S. Chekalin, Irina A. Bachurinskaya*

**Environmental footprint and its influence in the context of urban economy management . . . . .1461**

**Requirements for research paper design . . . . .1473**

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15, Выпуск 10, 2020  
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 10, 2020

## ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

## AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

## Реконструкция санаторного фонда Республики Крым с учетом оценки инвестиционной привлекательности

А.Е. Балакина<sup>1</sup>, И.С. Самылова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup>Центральные научно-реставрационные проектные мастерские (ЦНРПМ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Санаторно-курортная отрасль в Крыму имеет богатую историю. Анализ современного состояния санаторного фонда Республики Крым и натурные обследования оздоровительных учреждений крымского побережья показали, что за время их эксплуатации изменились требования к санаториям, а износ основных фондов составил до 50 %. Постановлением правительства Российской Федерации «Об утверждении федеральной целевой программы «Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя до 2020 года»» определено, что одним из важных направлений будет развитие санаторно-курортного комплекса Крыма. Поэтому в данной статье ставится вопрос о повышении конкурентоспособности санаторно-курортного комплекса Крыма по отношению к другим секторам Черноморского региона и зарубежным рекреационным объектам. Изучаются факторы, влияющие на реконструкцию санаториев: планировочные, социальные, технические и др.

**Материалы и методы.** Натурные обследования, обобщение материала по состоянию санаторного фонда РК, методам реконструкции. Систематизация собранного материала, графо-аналитический метод.

**Результаты.** Предлагается ввести систему оценки объектов санаторного фонда с учетом инвестиционной привлекательности. Вводится критерий «звездности». В качестве объектов исследования выбраны санатории г. Евпатория. Результатом исследования является карта-схема с ранжированием оздоровительных объектов. Разработанная в результате исследования методика позволит создать научно обоснованные рекомендации по выбору проектных решений при реконструкции санаторного фонда Республики Крым, повысит его архитектурные качества, в том числе и за счет привлечения инвестиций.

**Выводы.** В ходе исследования были решены поставленные задачи: улучшение уникальной курортной среды за счет привлечения инвестиций, повышение конкурентоспособности санаторно-курортного комплекса Крыма по отношению к другим секторам Черноморского региона и зарубежным рекреационным объектам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рекреационные комплексы, санаторный фонд, Черноморское побережье, инвестиционная привлекательность, санатории, Республика Крым, реконструкция, санаторно-курортное лечение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Балакина А.Е., Самылова И.С. Реконструкция санаторного фонда Республики Крым с учетом оценки инвестиционной привлекательности // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1353–1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1353-1362

## Reconstruction of health centres in the Republic of Crimea with consideration of their investment attractiveness

Alevtina E. Balakina<sup>1</sup>, Irina S. Samylova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Central Research and Restoration Design Workshops (TsNRPM); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The Crimean resort industry has a storied history. The analysis of the current state of resorts in the Republic of Crimea and on-site inspections of health facilities along the Crimean coast have proven that the requirements applicable to health resorts changed, while depreciation of their fixed assets reached 50 % in the process of their operation. According to Resolution “On Approval of the Federal Target Program “Social and Economic Development of the Republic of Crimea and Sevastopol through 2020”, issued by the Government of the Russian Federation, development of Crimean health resorts is an important objective of local development. Towards this end, the article brings up the issue of enhancing the competitiveness of Crimean health resorts if compared with other industries of the Black Sea region and foreign recreational facilities. This article focuses on the factors that affect the reconstruction of health resorts, including layout-focused, social, technical ones, etc.

**Materials and methods.** They include on-site inspections, consolidation of material on the state of health facilities in the Republic of Crimea, and reconstruction methods. Data collection and systematization, grapho-analytical method were also employed.

**Results.** The co-authors propose a health facility assessment system that will take account of their investment attractiveness. The “star rating” criteria is introduced. Health resorts in Yevpatoriya were chosen as the objects of this study. The re-

sult of the study is an index map that has health facilities ranked according to their investment attractiveness. The methodology of this study will allow to develop research-backed recommendations concerning the choice of design solutions for the reconstruction of health resorts in the Republic of Crimea, as well as the improvement of its architectural quality through fundraising.

**Conclusions.** The following problems were tackled in the course of the study: improvement of the unique resort environment through fundraising, enhancing the competitiveness of Crimean health resorts in comparison with other industries of the Black Sea region and foreign recreational facilities.

**KEYWORDS:** recreational facilities, health resorts, Black Sea coast, investment attractiveness, health centres, Republic of Crimea, reconstruction, treatment at health resorts

**FOR CITATION:** Balakina A.E., Samylova I.S. Reconstruction of health centres in the Republic of Crimea with consideration of their investment attractiveness. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1353-1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1353-1362 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Забота о здоровье граждан — одна из самых важных социальных задач нашего государства на протяжении нескольких веков. Полуостров Крым уникален своей природой, воздухом и красотой. Санаторно-курортная отрасль в Крыму имеет богатую историю: более 200 лет назад началось освоение берегов Тавриды.

На данный момент на территории полуострова готовы оказать оздоровительные услуги около 500 курортно-оздоровительных учреждений. Наблюдаются тенденции увеличения вида и качества предоставляемых услуг, поэтому вопрос реконструкции санаториев является наиболее острым. Постановлением правительства Российской Федерации «Об утверждении федеральной целевой программы “Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя до 2020 года”» определено, что одним из важных направлений будет развитие санаторно-курортного комплекса Крыма.

На территории полуострова можно выделить строящиеся санатории, отвечающие современным градостроительным, санитарным, оздоровительным, техническим требованиям, и тот фонд, который принадлежит эпохе первоначального освоения Крыма, а также здравницы, появившиеся в период СССР. В связи с этим особое внимание следует обратить именно на восстановление привлекательности и комфортабельности уже существующего санаторного фонда.

Анализ современного состояния и натурные обследования оздоровительных учреждений крымского побережья показали, что за время их эксплуатации изменились требования к санаториям, а износ основных фондов составил до 50 %. Были выявлены следующие проблемы, мешающие осуществлению оздоровления граждан в соответствии с мировыми стандартами: преобладание больших по мощности типов учреждений, нерациональное использование инженерных устройств, однотипность архитектурных решений, неэкономичность строительства и эксплуатации, моральный износ уже существующих объектов, сложность заполнения санаториев в зимний период [1].

Вопрос о состоянии санаторного фонда является одним из наиболее актуальных. Ведущие научно-исследовательские проектные институты Госстроя и Минздрава СССР в течение продолжительного времени занимались совершенствованием архитектурно-планировочных и функциональных решений лечебных учреждений; среди них такие, как ЦНИИЭП лечебно-курортных зданий, ГипроНИИЗдрав, ЛенЗНИИЭП, Союзкурортпроект и его филиалы и др. Кроме того, данной проблематике посвящен ряд фундаментальных работ таких специалистов, как А.Т. Полянский, Л.И. Марквардт, Л.А. Гришаев, Н.С. Полудов, М.В. Посохин, Н.Я. Гинзбург, А.В. Самойлов, Н.В. Соколов, В. Ткаченко, С.В. Курашова, И.А. Струева, Г. Каралева, И. Филиппович и др. Из современных источников можно выделить сборник [2]. Многообразие направлений и приемов организации современных рекреационных комплексов отражено в [3].

Несмотря на проведенные исследования, еще не был рассмотрен подход к реконструкции с точки зрения инвестиционной привлекательности санаториев. Этому вопросу и посвящена данная работа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подробно рассмотрев проблемы данной отрасли, мы сформулировали вопрос: каким образом провести реконструкцию санаториев с выявлением из них наиболее перспективных для вложений?

Прежде чем говорить о реконструкции с позиции инвестиционной привлекательности любого оздоровительного учреждения, следует иметь полное представление о текущем состоянии исследуемых объектов. Для этого были проведены сбор и обобщение материала о состоянии санаторного комплекса в Крыму, методах реконструкции в России и за рубежом. Итогом исследования стала систематизация собранного материала методом построения аналитических графических схем и таблиц. Разработана подробная классификация оздоровительных учреждений в Крыму. Для рассмотрения были выбраны факторы, наиболее значимые при реконструкции: архитектурно-планировочные, градостроительные, социально-экономические и др.

Рассмотрим факторы, влияющие на реконструкцию. Первый из них — период основания санаторного учреждения. Чем интересен данный критерий? Он позволит сделать выводы о конструктивной системе здания, его стилевых особенностях, планировочной структуре.

Во-первых, 40 % зданий были возведены до 1942 г. Эти учреждения обладают рядом особенностей, которые являются малопривлекательными в инвестиционном плане. Именно эта группа оздоровительных учреждений находится в зоне риска, именно они по тем или иным причинам не способны принимать людей для оздоровления и выставлены на продажу. В подавляющем большинстве санаторные учреждения данного типа имеют стеновую конструктивную систему, что является малопривлекательным фактором при возможной перепланировке. Также на территории большинства из них находятся объекты культурного наследия, для поддержания функционирования которых необходимы большие вложения. Эти учреждения возведены преимущественно в стиле сталинского ампира, с использованием традиционных методов и приемов (колонны, аркады, пилястры); здания величественные, масштабные, помпезные. К ним можно отнести санатории «Ударник» в г. Евпатория, «Симеиз» городского округа Ялта [4, 5].

Примерно 26 % санаториев запроектированы в 1960–1980-е гг. Вспомним, что в декабре 1954 г. на Всесоюзном совещании строителей «практика украшения в архитектуре была подвергнута резкой критике. Было решено всемерно развивать индустриальные методы строительства и типовое проектирование, повышать темпы строительства и увеличивать его экономичность». Активно вне-

дрялись в практику крупноблочные, крупнопанельные и сборные железобетонные конструкции. Переосмыслилось наследие конструктивистов, главное внимание уделялось удобству, прочности и экономичности, жизнедеятельность человека и производственные процессы определяли форму здания. Возведенные в это время санаторные комплексы отличаются крупными габаритами, прямоугольными формами, лаконичны и сдержаны («Ветеран», Алуштинский городской совет, «Санаторий им. Бурденко», г. Саки) [6].

21 % санаториев возводилось в 1980-е гг. и только 13 % — в 1990–2000-е гг. В эти годы произошло снижение темпа роста, наблюдалось стилевое разнообразие («Зори России», «Курпаты», городской округ Ялта).

Если говорить о приемах организации взаимосвязи помещений, то в практике строительства санаторных учреждений на крымском побережье использовались следующие методы проектирования.

В период регионального освоения крымского побережья (1900–1940-е) получил наибольшее распространение павильонный прием. Он характерен для санаторных комплексов малой мощности. Основные группы помещений не связаны между собой, что, с одной стороны, позволяет провести модернизацию отдельных частей комплекса без его приостановки, с другой стороны, порождает трудности, связанные с техническим обслуживанием корпусов. Многие санаторные учреждения данного типа имеют на территории объекты культурного наследия. Например, санаторий «Гурзуфский», городской округ Ялта (рис. 1, 2), «Карасанский», городской округ Алушта (рис. 3, 4), «Здравница» (бывший санаторий «Радуга», г. Евпатория), «Орленок», г. Евпатория и др.

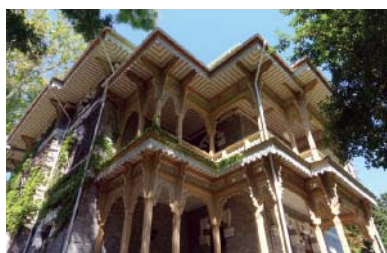


Рис. 1. Санаторий «Гурзуфский»

Fig. 1. Gurzufsky health centre



Рис. 2. Схема корпусов санатория «Гурзуфский»

Fig. 2. Gurzufsky health centre. Layout plan



Рис. 3. Санаторий «Карасанский»

Fig. 3. Karasansky health centre



Рис. 4. Схема корпусов санатория «Карасанский»

Fig. 4. Karasansky health centre. Layout plan

При централизованном размещении, когда в одном здании расположены все помещения, за исключением хозяйственных, связь между помещениями осуществляется в любой сезон года. Этот метод строительства является наиболее экономичным, позволяет повышать этажность санаторного учреждения, что бывает выгодно, например, для участков малой площади. Прием активно использовался в 1950-е гг., в период сталинского ампира, когда советские архитекторы черпали вдохновение в античных формах, старались максимально вписать здание в окружающую среду. Яркими примерами можно считать санатории «Таврида» и «Октябрь» в г. Евпатория (рис. 5, 6), «Старый Крым» Кировского района (рис. 7, 8), «Горный» и «Сосняк» городского округа Ялты и др. [7].

В советский послевоенный период особое распространение получил блочный прием проектирования. Основные группы помещения (спальные, блоки питания и культурно-массового обслуживания) изолированы друг от друга, при этом за счет

переходов создается удобная связь между данными группами помещений. Комплексы занимают значительную территорию, имеют преимущественно разновеликий силуэт, что является экономичным при проведении инженерных коммуникаций. Примеры: санатории «Орен-Крым», «Победа» в г. Евпатория (рис. 9–12), «Полтава-Крым» в г. Саки.

И, наконец, существует смешанный тип планировочной структуры, обладающий преимуществами и недостатками вышеперечисленных типов. К данному типу можно отнести планировку санаториев «Здравница» городского округа Ялта, «Санатория им. Н.К. Крупской» в г. Евпатория (рис. 13, 14), «Слава» (рис. 15, 16) [8] в г. Алушта.

Соответственно, каждый из приемов влияет на стоимость обслуживания санаторного комплекса, а также на объем вложений при модернизации. Так, учреждения павильонного типа будут наиболее удобными при проведении мероприятий модернизации без остановки работы комплекса, а централизованные будут удобными благодаря расположению



Рис. 5. Санаторий «Таврида»

Fig. 5. Taurida health centre



Рис. 6. Схема корпусов санатория «Таврида»

Fig. 6. Taurida health centre. Layout plan



Рис. 7. Санаторий «Старый Крым»

Fig. 7. Old Crimea health centre



Рис. 8. Схема корпусов санатория «Старый Крым»

Fig. 8. Old Crimea health centre. Layout plan



Рис. 9. Санаторий «Орен-Крым»

Fig. 9. Oren-Crimea health centre



Рис. 10. Схема корпусов санатория «Орен-Крым»

Fig. 10. Oren-Crimea health centre. Layout plan



**Рис. 11.** Санаторий «Победа»  
**Fig. 11.** Pobeda health centre



**Рис. 12.** Схема корпусов санатория «Победа»  
**Fig. 12.** Pobeda health centre. Layout plan



**Рис. 13.** «Санаторий им. Н.К. Крупской»  
**Fig. 13.** Im. Krupskoi health centre



**Рис. 14.** Схема корпусов «Санатория им.Н.К. Крупской»  
**Fig. 14.** Im. Krupskoi health centre. Layout plan



**Рис. 15.** Санаторий «Слава»  
**Fig. 15.** Slava health centre



**Рис. 16.** Схема корпусов санатория «Слава»  
**Fig. 16.** Slava health centre. Layout plan

всех коммуникаций (при их обновлении) в пределах одного здания.

На территории полуострова 64 % санаторных учреждений имеют обременение (среди них «Харак» городского округа Ялты, «Утес» Алуштинского городского совета), и только 36 % не имеют обременения (например, Первомайский» и «Юбилейный» в г. Евпатория). Сейчас большая часть первых из государственной собственности переводится в частную, выставлена на продажу («Горное солнце», «Ай-тодор» городского округа Ялты). С одной стороны, из особняков можно получить прекрасные спальные корпуса, так как большая часть их расположена на территории живописных парков, но, с другой стороны, существуют всевозможные ограничения по перепланировке данных объектов, строгие требования по их содержанию, что делает их малопривлекательными для инвестиций [9, 10].

Также большое значение имеет ориентирование на группы населения. В современной России детские санатории становятся нерентабельными, их активно продают частным лицам. В таких условиях сейчас находятся санатории: «Детский противоту-

беркулезный им. Т.Г. Шевченко», «Детский противотуберкулезный санаторий “Родина”», «Детский санаторий “Звездочка”» и др. Инвесторы предпочитают вкладываться в учреждения, готовые принять как взрослых, так и детей, чтобы получить наибольшую прибыль [11].

Немаловажным фактором является и парковая территория объектов оздоровления. Она является привлекательной как для дальнейшего расширения санаторного комплекса (если требуется увеличение койко-мест), так и для дальнейшего ее благоустройства (если нет необходимости в расширении комплекса, но необходимо повысить его привлекательность, улучшить качество предоставляемых услуг). Приведем несколько примеров санаториев с парковыми территориями более 10 га: «Гурзуфский», «Нижняя Ореанда», «Айвазовское» в городском округе Ялта [12, 13].

Также следует обращать внимание на конструктивное решение здания. Санатории на основе каркасной и комбинированной конструктивной систем дают больше преимуществ при модернизации планировки и внешнего облика комплексов,

в отличие от стеновой несущей системы. Из таких инвестиционно-привлекательных объектов можно назвать «Санаторий им. Н.К. Крупской» [14].

Рассмотрим показатель вместимости санаторных комплексов. 46 % из них рассчитано на 300–500 койко-мест, 21 % — более чем на 500 койко-мест («Первомайский», «Фемида» в г. Евпатория). Это — санаторные учреждения послевоенных лет, когда остро стоял вопрос оздоровления граждан. Соответственно, они представляют собой большие по протяженности комплексы и на данный момент не являются привлекательными для вложений, так как существуют тенденции уменьшения мощности объектов, экономии ресурсов, использования нетрадиционных источников энергии, что в условиях больших комплексов затруднительно. 33 % учреждений могут принять до 300 посетителей — эта цифра является наиболее экономически привлекательной для инвесторов, поскольку она позволит обеспечить 100%-ю заполняемость санаториев круглогодично.

Также был проведен мониторинг сезонной работы оздоровительных учреждений. Выяснилось, что только 61 % санаториев могут предоставлять свои услуги в течение всего года, 39 % работают сезонно. Это связано со многими факторами, один из них — это водная обеспеченность: только 64 % санаториев обеспечены и холодной, и горячей водой круглосуточно, 36 % работают по графику; особенно остро эта проблема стоит в восточной части полуострова, в районах Судака, Нового Света и т.д. Во-вторых, слабо развит досуговый комплекс, как следствие этого — малая заполняемость санаториев в зимний период, хотя многие из них имеют удачное расположение в горах, где можно запроектировать отличные лыжные трассы и др. Соответственно, инвесторам будут интересны объекты, которые можно сделать привлекательными для посещения в любое время года [15].

Еще одним важным фактором является уровень развития дополнительных услуг комплекса. Если посмотреть на мировой опыт проектирования, то следует отметить, что за рубежом нет как таковых санаторных учреждений — предпочтение отдается СПА-отелям с широким спектром предоставляемых услуг; они обеспечивают высокий уровень посещаемости вне зависимости от сезона [16–18].

Важным критерием является и профиль санаторного учреждения. Наименее успешными являются комплексы узкоспециализированного профиля, в частности противотуберкулезного («Противотуберкулезный санаторий им. А.П. Чехова», городской округ Ялта).

Подведен и общий итог «морального старения» комплексов. В 30 % оздоровительных учреждений проведен ремонт отдельных корпусов, в большей мере косметического характера (штукатурно-окрасочные работы); 22 % — капитальный ремонт отдельных корпусов с заменой инженерных систем, штукатурно-окрасочными работами, но без качественных изменений в планировке объекта, без обновления устаревшего номерного фонда, без альтернативных источников энергии; 24 % — реконструкция с обновлением номерного фонда, фасадов, с улучшением водного и досугового комплекса (хорошими примерами реконструкции можно считать санатории «Сакрополь» в г. Саки, «Таврия» в г. Евпатория); 24 % требуют серьезного ремонта всех систем (например, «Санаторий им И.А. Наговицына» в г. Евпатория, «Пионер» в городском округе Ялта). Инвесторам было бы интересно вкладываться в объекты без серьезных разрушений, в относительно хорошем состоянии [3, 19, 20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После внимательного изучения санаторного комплекса крымского побережья предлагается создать систему ранжирования санаториев с позиции их инвестиционной привлекательности, где три звезды — наиболее привлекательный критерий, одна — наименее (табл.). Опираясь на данную таблицу, можно сделать прогноз инвестиционной привлекательности санаториев, определить, какие из них в первую очередь будут модернизированы.

Рассмотрим данный подход на примере санатория «Прибой» в г. Евпатория. В таблице звездочкой будут выделены характеристики данного объекта. В общем, санаторий является наиболее привлекательным для инвестирования, и действительно, данный объект включен в инвестиционную программу г. Евпатория.

**Табл.** Критерии инвестиционной привлекательности санаторного фонда

**Table.** Criteria of investment attractiveness of health centres

Критерии / Criteria	1 звезда 1 star	2 звезды 2 star	3 звезды 3 star
Удаленность от моря / Distance from the sea:			
До 500 м / Up to 500 m	–	–	*
500–1000 м / 500–1,000 m	–	+	–
Более 1000 м / Over 1,000 m	+	–	–

Окончание табл. / End of Table

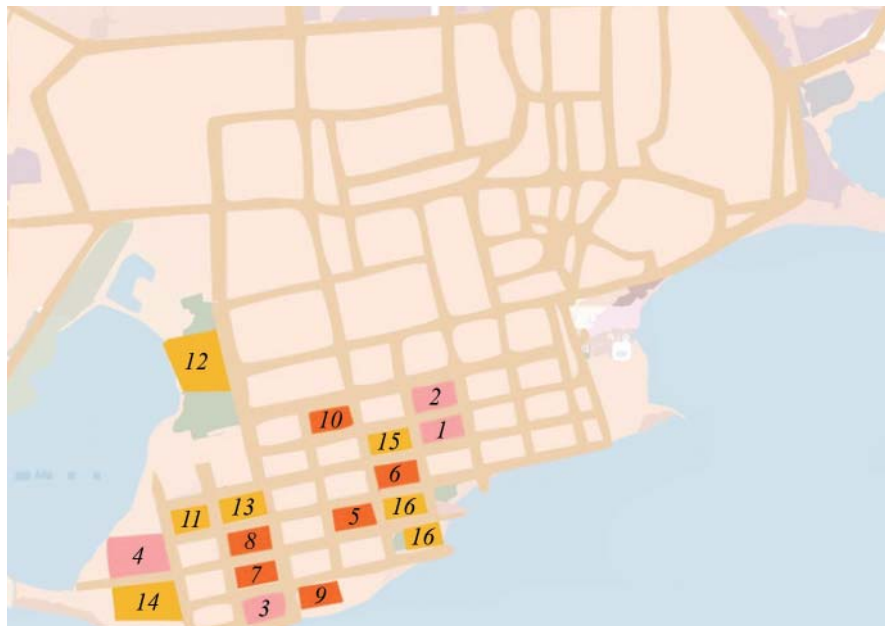
Критерии / Criteria	1 звезда 1 star	2 звезды 2 star	3 звезды 3 star
Профиль санатория — не противотуберкулезный Health centre specialization: non-tuberculosis	–	–	*
Планировка санатория Health centre conceptual plan:			
Павильонная / Pavilion	–	*	–
Централизованная / Centralized	–	+	+
Блочная / Modular	–	–	–
Наличие большой парковой территории Availability of a large park	+	+	*
Вместимость / Capacity:			
До 300 мест / Up to 300 beds	–	–	*
500–1000 мест / 500–1,000 beds	–	+	–
Более 1000 мест / Over 1,000 beds	+	–	–
Возрастные группы / Age groups:			
Взрослые и дети / Adults and children	–	–	*
Дети / Children	+	*	–
Взрослые / Adults	–	–	–
Наличие культурного наследия / Cultural heritage:			
Да / Yes	*	–	–
Нет / No	–	–	+
Дата основания / Foundation date:			
До 1940-го / Before 1940	+	–	–
1940–1960ies	–	*	–
1960–1980ies	–	–	+
Архитектурные формы / Architectural forms:			
Классические / Classic	+	+	–
Конструктивизм / Constructivism	–	–	+
Смешанные / Mixed	–	*	–
Состояние объекта / Construction facility state:			
Требуется косметический ремонт Minor renovation needed	–	–	+
Капитальный ремонт / Overhaul needed	–	*	–
Значительные разрушения / Significant destruction	+	–	–

По такой системе была дана оценка санаторно-му фонду г. Евпатория (рис. 17). Получились следующие результаты. Санатории «Орен-Крым», «Буревестник», «Приморье», «Изумрудный» являются на данный момент одними из наиболее востребованных в городе, постоянно проводится косметический ремонт корпусов и номерного фонда, парковая территория отличается ухоженностью. Санатории второй группы (2 звезды) — это те, которые на данный момент активно ищут инвесторов, где в ближайшие годы планируется реконструкция.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, были решены поставленные в исследовании задачи: применение разработанной

методики при реконструкции санаторного фонда Республики Крым позволит существенно повысить его архитектурные качества, сделать востребованной уникальную курортную среду за счет привлечения инвестиций. Научно обоснованные рекомендации по выбору проектных решений с включением критериев, влияющих на повышение инвестиционной привлекательности объектов, обеспечат повышение конкурентоспособности санаторно-курортного комплекса Крыма по отношению к другим секторам Черноморского региона и зарубежным рекреационным объектам. Данная работа дает возможность планировать последующие исследования в области реконструкции санаторного фонда.



**Рис. 17.** Схема инвестиционной привлекательности санаторного фонда г. Евпатория: ■ — наиболее инвестиционно-привлекательные (3 звезды): 1 — Изумрудный; 2 — Орен-Крым; 3 — Приморье; 4 — Буревестник; ■ — инвестиционно-привлекательные (2 звезды): 5 — Прибой; 6 — Смена; 7 — Здравница; 8 — Радуга; 9 — Санаторий им. Крупской; 10 — Санаторий им. Наговицина; ■ — наименее инвестиционно-привлекательные (1 звезда): 11 — Санаторий им. Шевченко; 12 — Родина; 13 — Первомайский; 14 — Юбилейный; 15 — Таврида; 16 — Орленок

**Fig. 17.** Degrees of investment attractiveness of health centres in Eupatoriya: ■ — most investment-worthy health centres (3 stars): 1 — Izumrudny; 2 — Oren-Crimea; 3 — Primorye; 4 — Burevestnik; ■ — investment worthy health centres (2 stars): 5 — Priboi; 6 — Smena; 7 — Zdravnitsa; 8 — Raduga; 9 — Health centres named after Krupskoi; 10 — Health centres named after Nagovitsina; ■ — least investment worthy health centres (1 star): 11 — Health centres named after Shevchenko; 12 — Rodina; 13 — Pervomaisky; 14 — Yubileiny; 15 — Taurida; 16 — Orlenok

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матушевская Е.А., Поддубная Е.С. Социально-экономическое развитие санаторно-курортного комплекса на Крымском полуострове: проблемы и перспективы // Проблемы и перспективы развития туризма в Южном федеральном округе : сб. науч. тр. Симферополь, 2017. С. 179–182.
2. Проблемы развития архитектуры курортно-туристских зданий и комплексов : сб. науч. тр. / под ред. В.В. Гусева. М. : ЦНИИЭП, 1981. 163 с.
3. Боляева К.О. Теоретические модели современных загородных рекреационных комплексов // АСADEMIА. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 71–76. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-71-76
4. Большакова О.В., Мальгин А. Русская Ривьера. Курорты, туризм и отдых в Крыму в эпоху империи. Конец XVIII – начало XX в. // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 5: История. 2005. № 4. С. 47–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/2005-04-012-malgin-a-russkaya-riviera-kurorty-turizm-i-otdyh-v-krymu-v>

- epochu-imperii-konets-xviii-nachalo-hh-v-simferopol-2004-352-s
5. Кузнецова Л.А. Курортное строительство в 1920–1950-е годы: вопросы организации и управления // Труды института Российской истории РАН. 2014. № 12. С. 244–262.
6. Казарина Л.А. О становлении и развитии отечественного курортного дела в советский период // Актуальные вопросы современной сферы услуг : сб. науч. тр. Иркутск, 2012. С. 77–83.
7. Шинтяпина Е.С. Архитектурные тенденции создания санаторных комплексов юга Советского Союза 1930–1950-х годов // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 12–9. С. 64–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27653828>
8. Турицын И.В., Симонян Г.А. Социально-экономические проблемы развития рекреационного потенциала Крыма (конец 1980-х–1991 гг.) // Современная научная мысль. 2014. № 3. С. 157–172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21582519>

9. Freund D., Munsters W. Developments in the hotel industry: design meets historic properties. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228648576\\_DEVELOPMENTS\\_IN\\_THE\\_HOTEL\\_INDUSTRY\\_DESIGN\\_MEETS\\_HISTORIC\\_PROPERTIES](https://www.researchgate.net/publication/228648576_DEVELOPMENTS_IN_THE_HOTEL_INDUSTRY_DESIGN_MEETS_HISTORIC_PROPERTIES)

10. Penner R.H., Adams L., Rutes W. Hotel design, planning and development. London : Routledge, 2013. 420 p. DOI: 10.4324/9780080967004

11. Голубова Т.Ф. Состояние и перспективы дальнейшего развития санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации детей в Республике Крым // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2016. Т. 93. № 2–2. С. 63–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28359038>

12. Казаков Л.К., Данекина В.Н. Перспективы развития Крыма и ландшафтно-экологическое планирование его прибрежных курортных зон // Вестник экологического образования в России. 2015. Т. 4. С. 29–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25460912>

13. Gray F. Designing the seaside: Architecture, society and nature. Reaktion Books, 2006. 336 p.

14. Жеребило Н.В. Модернизация санаторно-курортных комплексов прибрежных зон города

Сочи // Архитектон: известия вузов. 2008. № 1 (21). URL: [http://archvuz.ru/2008\\_1/4/](http://archvuz.ru/2008_1/4/)

15. Бажанова А.Д. Влияние фактора сезонности на развитие туризма в Республике Крым // Молодая наука : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. для студентов и молодых ученых. Симферополь, 2017. С. 131–132.

16. Rutes W.A., Penner R.H., Adams L. Hotel design, planning and development. W.W. Norton & Company, 2001. 422 p.

17. Connah R. Welcome to the hotel architecture. Cambridge : MIT Press Ltd., 1998. 160 p.

18. Rangana Sri Shalika Wadippuli Arachchi, Mohd Shukri Ab. Yajid, Khatibi A. Hoteliers perspective analysis of eco-resort concept: a study of Sri Lanka eco-resorts // Tourism, Leisure and Global Change. 2016. Vol. 3. Pp. 141–152. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hoteliers-perspective-analysis-of-eco-resort-a-of-Shalika-Yajid/bd4e93717081e3cacd14e017adaa855458635e28#references>

19. Bromberek Z. Eco-resorts: Planning and design for the tropics. Routledge, 2009. 237 p.

20. Badarnah L. Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope: PhD Thesis. Delft University of Technology, 2013. DOI: 10.4233/uuid:4128b611-9b48-4c8d-b52f-38a59ad5de65

Поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 25 августа 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Алевтина Евгеньевна Балакина — кандидат архитектуры, доцент, заведующая кафедрой архитектуры; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 267802; balakinaae@mail.ru;

Ирина Сергеевна Самылова — архитектор; Центральные научно-реставрационные проектные мастерские (ЦНРПМ); 109544, г. Москва, ул. Школьная, д. 24; Samylova.1994@mail.ru.

## REFERENCES

1. Matushevskaya E.A., Poddubnaya E.S. Socio-economic development of the sanatorium complex on the Crimean Peninsula: problems and prospects. *Problems and prospects of tourism development in the Southern federal district : collection of scientific papers*. Simferopol, 2017; 179-182. (rus.).

2. Gusev V.V. (ed.). *Problems of the development of architecture of resort and tourist buildings and complexes: a collection of scientific papers*. Moscow, TSNIIEP, 1981; 163. (rus.).

3. Bolyaeva K.O. Theoretical models of modern suburban recreational complexes. *ACADEMIA. Architecture and construction*. 2018; 3:71-76. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-71-76 (rus.).

4. Bolshakova O.V., Malgin A. Russian Riviera. Resorts, tourism and recreation in the Crimea in the era of the Empire. Late XVIII – early XX century. *Social*

*and human Sciences. Domestic and foreign literature. Ser. 5: History*. 2005; 4:47-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/2005-04-012-malgin-a-russkaya-riviera-kurorty-turizm-i-otdyh-v-krymu-v-epohu-imperii-konets-xviii-nachalo-hh-v-simferopol-2004-352-s> (rus.).

5. Kuznetsova L.A. Resort construction in the 1920s–1950s: issues of organization and management. *Proceedings of the Institute of Russian History*. 2014; 12:244-262. (rus.).

6. Kazarina L.A. About the formation and development of the domestic resort business in the Soviet period. *Topical issues of the modern service sector : collection of proceedings*. Irkutsk, 2012; 77-83. (rus.).

7. Shintyapina E.S. Architectural trends create health resorts of the South of the Soviet Union, 1930–1950-ies. *Modern trends in science and technology*.

2016; (12-9):64-67. URL: [https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27653828\\_\(rus.\)](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27653828_(rus.)).

8. Turitsyn I.V., Simonyan G.A. Socio-economic problems of recreational potential Crimea (late 1980–1991). *Modern scientific thought*. 2014; 3:157-172. URL: [https://elibrary.ru/item.asp?id=21582519\\_\(rus.\)](https://elibrary.ru/item.asp?id=21582519_(rus.)).

9. Freund D., Munsters W. *Developments in the hotel industry: design meets historic properties*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228648576\\_DEVELOPMENTS\\_IN\\_THE\\_HOTEL\\_INDUSTRY\\_DESIGN\\_MEETS\\_HISTORIC\\_PROPERTIES](https://www.researchgate.net/publication/228648576_DEVELOPMENTS_IN_THE_HOTEL_INDUSTRY_DESIGN_MEETS_HISTORIC_PROPERTIES)

10. Penner R.H., Adams L., Rutes W. *Hotel design, Planning and development*. London, Routledge, 2013; 420. DOI: 10.4324/9780080967004

11. Golubova T.F. State and prospects of further development of sanatorium treatment and medical rehabilitation of children in the Republic of Crimea. *Problems of Balneology, Physiotherapy, and Exercise Therapy*. 2016. 93(2-2):63-64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28359038>

12. Kazakov L.K., Danekina V.N. Prospects of development of the Crimea and landscape ecological planning for its coastal resort area. *Bulletin of Environmental Education in Russia*. 2015; 4:29-31. URL: [https://elibrary.ru/item.asp?id=25460912\\_\(rus.\)](https://elibrary.ru/item.asp?id=25460912_(rus.)).

13. Gray F. *Designing the seaside: Architecture, society and nature*. Reaktion Books, 2006; 336.

14. Zhrebilo N.V. Modernization of sanatorium-resort complexes of coastal zones of Sochi. *Architec-*

*ton: Proceedings of Higher Education*. 2008; 1(21). URL: [http://archvuz.ru/2008\\_1/4/\\_\(rus.\)](http://archvuz.ru/2008_1/4/_(rus.)).

15. Bazhanova A.D. The influence of the seasonality factor on the development of tourism in the Republic of Crimea. *Young Science : collection of scientific papers of a scientific and practical conference for students and young scientists*. Simferopol, 2017; 131-132.

16. Rutes W.A., Penner R.H., Adams L. *Hotel design, planning and development*. W.W. Norton & Company, 2001; 422.

17. Connah R. *Welcome to the hotel architecture*. Cambridge, MIT Press Ltd., 1998; 160.

18. Rangana Sri Shalika Wadippuli Arachchi, Mohd Shukri A15. Connah R. *Welcome to the hotel architecture*. Cambridge, MIT Press Ltd., 1998; 160.b. Yajid, Khatibi A. Hoteliers respective analysis of eco-resort concept: a study of Sri Lanka eco-resorts. *Tourism, Leisure and Global Change*. 2016; 3:141-152. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hoteliers-perspective-analysis-of-eco-resort-a-of-Shalika-Yajid/bd4e93717081e3cadc14e017adaa855458635e28#references>

19. Bromberek Z. *Eco-resorts: Planning and Design for the Tropics*. Routledge, 2009; 237.

20. Badarnah L. *Towards the LIVING Envelope: Biomimetics for Building Envelope Adaptation: PhD Thesis*. Delft University of Technology, 2013. DOI: 10.4233/uuid:4128b611-9b48-4c8d-b52f-38a59ad5de65

Received September 30, 2019

Adopted in revised form on August 13, 2020.

Approved for publication on August 25, 2020.

**B I O N O T E S:** **Alevtina E. Balakina** — Candidate of Architecture, Associate Professor, the Head of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 267802; [balakinaae@mail.ru](mailto:balakinaae@mail.ru);

**Irina S. Samylova** — Architect; **Central Research and Restoration Design Workshops (TsNRPM)**; 24 Shkolnaya str., Moscow, 109544, Russian Federation; [Samylova.1994@mail.ru](mailto:Samylova.1994@mail.ru).

## Значение местных ветров в аэрации урбанизированных территорий с жарким штилевым условием климата

А.И. Гиясов, Т.Б. Гиясов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Город с его высотной застройкой, озеленением и элементами благоустройства, препятствующими движению воздуха, усугубляет безветрие, что обуславливает климат городов южных широт, характеризующийся жарой и штилем. При этом в городской застройке образуются застой и перегрев воздуха, определяющие ощущение духоты, а также значительные загрязнения воздуха от выбросов негативных источников антропогенного характера, что требует систематизации аэродинамики окружающей городской среды путем формирования местных ветров с использованием энергии солнца.

**Материалы и методы.** С целью выявления роли инсоляции в формировании местных ветров термического происхождения, способствующих оздоровлению среды макро- и микромасштаба, были приняты методы теоретических исследований, масштабных натуральных инструментальных измерений, визуальных наблюдений путем задымления структуры городской территории и прилегающего ландшафта, а также лабораторных исследований тепло-ветровых процессов на физической модели городов.

**Результаты.** Установлено, что при отсутствии поля ветра общей циркуляции на территории городской застройки в системе проветривания города формируются самостоятельные воздушные течения локального характера за счет термических разностей островов тепла и прохлады, на основе которой сформулирована модель формирования городских местных ветров и установлена зависимость скорости местных ветров от термической контрастности городских островов. Составлена классификация моделей формирования аэрации на уровне макроаэрации; мезоаэрации; микроаэрации и наноаэрации.

**Выводы.** Определено направление практического применения теории жарко-штилевых процессов в планировании урбанизированных территорий. Систематизирована аэродинамика городской среды за счет активизации местных ветров термического происхождения. Изучен процесс формирования ветров местного термического происхождения, составлена классификация моделей формирования естественного проветривания территории городов. Выявлены пути использования солнечной энергии с целью создания местных ветров для организации микроклиматической среды и оздоровления окружающей среды городских территорий и структур, являющиеся предпосылкой для целенаправленного планирования, объемно-пространственного и планировочного решения городских построек, благоустройства, озеленения территории и архитектурно-конструктивного решения зданий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** город, застройка, климат, ветер, аэрация, штиль, инсоляция, бриз

*Благодарность.* Работа проводилась в соответствии с планом научно-исследовательской работы кафедры проектирования зданий и сооружений НИУ МГСУ по проблеме «Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий и городов».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Гиясов А.И., Гиясов Т.Б. Значение местных ветров в аэрации урбанизированных территорий с жарким штилевым условием климата // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1363–1371. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.10.1363-1371

## The importance of local winds for the aeration of urban areas having hot and windless climatic conditions

Adham I. Giyasov, Timur B. Giyasov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** A city with its high-rise buildings, greenery and landscaping that prevent air motion aggravate windless conditions typical for climates in the cities located in the southern latitudes characterized by heat and lack of wind. Urban built-up areas have stagnant and overheated air that causes sultriness and significant air pollutions caused by anthropogenic sources. These factors require systematization of the local aerodynamics by means of local wind generation using solar energy.

**Materials and methods.** Methods of theoretical research, large-scale field measurements involving the use of instruments, visual observations by means of smoke screening of the urban area's structure were applied and laboratory research into thermal and wind processes using physical models of cities were applied to identify the role of insolation in the generation of local thermal winds that improve the local environment on the micro- and macroscale.

**Results.** The author has found that if built-up urban areas have no general circulation wind fields, urban aeration systems develop local independent air flows due to the temperature difference between heat and cool islands. The temperature difference was applied as the source material for an urban wind model and it also helped to identify the dependence of the local wind velocity on the thermal contrast of urban islands. A classification of aeration models is developed at macro; meso-; micro- and nanoscales.

**Conclusions.** The practical area of application of the theory of hot and windless processes was identified in respect of urban area planning. The aerodynamics of an urban environment was systematized due to the generation of local thermal winds. The process of local thermal wind generation was studied; the classification of natural aeration models was made for urban areas. Methods of using solar energy were applied to generate local winds, to develop the microclimate and to enhance the environment of urban areas and structures as a prerequisite for targeted urban planning actions, three-dimensional space-planning solutions that apply to urban structures, landscaping, architectural and structural concepts of buildings.

**KEYWORDS:** city, built-up area, climate, wind, aeration, windless conditions, insolation, breeze

*Acknowledgments.* The work was performed in accordance with the research schedule of Department of Design of Buildings and Structures, NRU MGSU, focused on "Function, Structure, Environment in the Architecture of Buildings and Towns".

**FOR CITATION:** Giyasov A.I., Giyasov T.B. The importance of local winds for the aeration of urban areas having hot and windless climatic conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1363-1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1363-1371 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Эффект ослабления скорости ветра в городе является общеизвестным фактором. Основное изменение воздушного потока происходит из-за сложности орографии городских морфоструктур.

Город со своими высотными постройками, элементами озеленения и благоустройства препятствует передвижению воздуха на территории, увеличивает безветрие в летний период, что характерно для климатических условий многих городов южных экваториальных широт. При этом усугубляется условие «духоты» воздуха и его загрязнение от источников антропогенного характера, ухудшающее экологию окружающей среды.

Ветер — один из ведущих экологических факторов, оказывающий наибольшее влияние на формирование микро- и биоклимата внешней среды и загрязненность атмосферного воздуха городского бассейна.

Создание комфортных условий в городской среде, строительство зданий и сооружений и в целом объектов различного функционального назначения невозможно без изучения такого важного фактора микроклимата, экоклимата и биоклимата, как ветер.

Развитие современного высотного строительства с применением новых эффективных строительных материалов и конструкций с постоянно растущей этажностью, а также намеченные в перспективе темпы строительства в районах с экстремальными климатическими условиями требуют новых научных подходов в области архитектурно-строительной аэродинамики.

Местные ветры проявляют себя в городах республик Центральной Азии и Закавказья, а также в городах стран Ближнего Востока, Азии, Северной и Южной Америки, Австрии, Европы. Климатические условия этих регионов характеризуются жарким штилевым профилем погоды, длительность которой составляет до 8 месяцев в течение летнего и осенне-весеннего периода с высокими температу-

рами воздуха до 45–48 °С в тени и низкой скоростью ветра до 3 м/с<sup>1</sup>.

В подобных экстремальных жарких маловетренных и штилевых условиях климата использование энергии солнца для формирования местных ветров путем применения механизма взаимодействия инсоляции с деятельной поверхностью городской застройки является единственным приоритетным шагом в решении задачи по улучшению микроклимата, биоклимата и экологической среды, окружающей человека.

Систематизация аэродинамики окружающей городской среды путем формирования местных ветров становится в последние годы повседневной задачей проектировщиков при архитектурно-строительном проектировании зданий, городов и населенных пунктов, деятельного слоя городов в целом, подвергающегося интенсивной инсоляции. При этом значения аэродинамических показателей играют немаловажную роль в принципиальном объемно-композиционном и архитектурно-планировочном решении городской застройки, а также в объемно-планировочном, архитектурно-конструктивном решении зданий.

В этой связи вопросы архитектурно-строительной аэродинамики в городах с экстремальными штилевыми и маловетренными условиями привлекают все больший интерес исследователей в области изучения охраны окружающей среды человека и проектировщиков в процессе проектирования. Указанная задача составляет основную часть современной архитектурно-строительной аэродинамики. Она позволяет оценить качество планирования городов, населенных мест, проектов городских застроек с точки зрения аэродинамики, и при необходимости вносить в них соответствующие коррективы путем объемно-планировочных методов и архитектурно-строительных средств.

<sup>1</sup> Краткий климатический справочник по странам мира / под ред. Е.П. Борисенкова. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.

Город с его плотной застройкой, препятствующей преобладающему атмосферному ветру, углубляет движение воздуха, снижая скорость ветра на 50–70 %. В то же время жаркие штилевые дни создают благоприятные условия для формирования слабых местных воздушных течений термического происхождения при инсоляции.

Орографически-термические условия деятельной поверхности городской территории накладывают определенный отпечаток на характер внутригородских различий метеорологических факторов и, в частности, ветровых характеристик городской территории.

Отсутствие ветра или безветрие, как показывают наши многолетние натурные исследования, проведенные на территории городов южных географических широт, имеет малую вероятность. Ветер местного характера в объеме воздуха над или возле термически контрастных энергоактивных поверхностей городских структур при условии их инсоляции действует регулярно, что определяет направления эффективного использования его для аэрации территории города и помещений зданий [1, 2].

При изучении гигиенических характеристик состояние человека в жарком климате при сочетании жары с безветрием определяется как наихудшее состояние. В то же время указывается, что возможность смягчения теплового воздействия можно создать даже при незначительном движении воздуха со скоростью около 1 м/с.

Результаты гигиенических исследований подтверждают, что комфортной скоростью ветра на территории городов, определяющей тепловое состояние человека, является скорость в пределах 0,5–3,0 м/с в летний теплый период года, длительность которого составляет 4 и более месяцев в центральноазиатских и закавказских республиках, 6 и более месяцев в азиатских республиках СНГ [3, 4].

Неподвижный воздух в условиях жаркой погоды в городах при температуре 31 °С вызывает дискомфорт в организме человека, при переходе воздуха в движение со скоростью 1 м/с предел комфорта увеличивается до 35 °С. Гигиеническая комфортная температура воздуха для человека в помещении достигается при температуре 25–26 °С при подвижности воздуха 1 м/с. Для достижения подобного эффекта при температуре 27–28 °С необходима скорость ветра 2 м/с. С переходом неподвижного воздуха в движение зона комфорта расширяется на 8–10 °С [5–7].

Малые скорости ветра, формирующегося на урбанизированных городских территориях и в помещениях зданий, оказывают негативное воздействие на физиолого-гигиеническое состояние человека и уровень загрязнения приземного слоя атмосферы воздуха и имеют важное санитарно-гигиеническое и экологическое значение.

Вследствие значительного количества штилевых дней на территориях городов повышенной этажности и плотности застройки, вопрос естественной вентиляции территории застройки играет важную роль. В условиях безветрия складывается перегреваемая дискомфортная среда, в которой терморегуляционный аппарат человека находится в крайнем напряжении, что способствует снижению производительности труда и приводит к повышению детской смертности.

В настоящее время изучению закономерностей ветрового режима в градостроительных целях уделяется большое внимание.

Существующие теоретические и экспериментальные исследования в этой области имеют срок исторической давности, разрознены и чаще всего носят описательный и локальный характер [8–11].

Экологическая ситуация в городах характеризуется крайне высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Одним из основных факторов образования высокого уровня загрязнений является возникновение на территории населенных мест слабых ветров, характерные для многих городов с плотной застройкой к чему были посвящены ряд исследований [12–15].

Исследования проблемы градостроительной аэродинамики обобщены в трудах отечественных и зарубежных ученых [16–20]. Несмотря на достаточно большое количество исследований в данной области, вопрос естественной аэрации городских территорий и зданий в погодных условиях с низкой скоростью ветра и штиля является малоизученным, что требует проведения дальнейшего изучения с разработкой практических расчетных методов с целью применения их в градостроительном проектировании.

Следует отметить существенный пробел в решении очень перспективной и характерной для городов южных географических широт проблемы естественной аэрации застройки и зданий в специфических климатических условиях с доминирующими жаркими продолжительными штилевыми погодными условиями. При этом целенаправленное использование солнечной энергии для улучшения дискомфортных жарких штилевых условий климата и улучшения воздушного бассейна городов путем применения планировочных, архитектурно-строительных методов и средств является логическим шагом в градостроительном проектировании.

Отмечается, что снижение скорости ветра макроклиматического характера повышает вероятность формирования и развития местных ветров за счет термического температурного контраста энергоактивных поверхностей и разности плотности воздуха над ними в разных частях городской территории, что обусловлено орографическим строением развития города, соотношением между тепловыми островами и островами прохлады, формирующимися при условии их инсоляции. Все это

приводит к изменению параметров микроклимата, биоклимата и загрязненности воздуха территории и помещения зданий.

Местные бризовые ветры по масштабу представляют собой микроветры — воздушные потоки небольшой протяженности от нескольких метров, и макроветры — воздушные потоки большой протяженности, до десятков километров, сформированные в зависимости от условий инсоляции энергоактивных и энергопассивных деятельных слоев.

Термические особенности, вызванные разнородностью нагрева различных частей территории городов и строительных объектов, вызывают поля возбуждения температуры и ветра местного происхождения.

Процесс формирования и развития местных ветров основывается на теории свободного конвективного движения, протекающего под влиянием подъемной силы закона Архимеда. Для того чтобы местные ветры имели свое развитие, необходимо ослабление общего атмосферного ветрового фона, поскольку он способен ликвидировать ветры локального характера.

Горизонтальные градиентные температуры между островами тепла и прохлады, формируемые между облучаемой площадкой и зеленым массивом инсолируемых и теневых фасадов зданий и др., являются причиной образования естественной циркуляции воздуха и термических возмущений, которые в зависимости от значения контраста между очагами могут быть периодически или непрерывно действующими.

Температура приземного слоя воздуха территории городской застройки имеет свои особенности и в разных частях города непостоянна, что обусловлено многообразием искусственных форм городского ландшафта. Температура воздуха в крупных городских зеленых массивах обычно в теплое время года ниже, чем на остальных территориях города, разность составляет 5–10 °С и более, что служит причиной образования местных ветров термического происхождения.

Расчетные методы учета условий термического проветривания можно решить, используя закон Стивенсона. Основой расчета является определение градиента давления, представляющего собой силу, которая действует только на массу воздуха, расположенного на охлаждаемом острове. Эффективность термического проветривания возрастает с увеличением площади охлаждаемых островов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью выявления роли инсоляции в формировании местных ветров термического происхождения, способствующих оздоровлению среды макро- и микромасштаба, были приняты методы теоретических исследований, масштабных натуральных инструментальных измерений факторов кли-

мата и микроклимата с применением современных метеорологических и теплофизических приборов, визуальных наблюдений путем задымления структуры городской территории и прилегающего ландшафта дымовыми шашками, а также лабораторных исследований теплофизических процессов на физической модели городов с помощью имитации нагрева подстилающих поверхностей. В этой связи определена следующая методика экспериментальных исследований.

Масштабные натурные исследования факторов микроклимата (температура и влажность воздуха, скорость, направления и повторяемость ветра, интенсивность солнечной радиации, термический режим деятельной поверхности) морфозастроек территории города южной географической широты СНГ, продолжительность теплого периода в которой составляет 6 и более месяцев, производились синхронно группой студентов и магистров во главе с автором статьи. В процессе проведения экспериментов в наиболее характерных городских ландшафтах использовались портативные приборы, такие как тепловизионный инфракрасный термометр FLIR TG165, пирометр GM1350, testo-610, цифровой термометр EM 9020C, термоэлектрический актинометр AT-50, анемометр AMTAST AMF001. Пункты наблюдения на обследуемой территории размещались с учетом функционального их назначения таким образом, чтобы материалы наблюдений отражали характерные особенности ландшафта данной территории с соответствующим условием инсоляции. Одновременно с производством измерений велись визуальные наблюдения за аэродинамической циркуляцией воздуха путем задымления характерных территорий города дымовыми шашками (согласовано с отделом градостроительства городской администрации и пожарным управлением) с последующей съемкой характера изменения местных ветровых процессов. С целью обобщения и выявления характеристики формирования местных бризовых ветров города, кроме результатов натурных исследований, использовались также данные метеорологических станций, расположенных на территории исследуемого города.

Элементы городского ландшафта, здания и подстилающие поверхности, составляющие энергоактивные деятельные поверхности и зеленые массивы; водоемы, составляющие энергопассивные поверхности, и их сочетание, отражающие реальные условия городского ландшафта, были имитированы на физическом стенде исследования на основе теории подобия и моделирования школы академиков М.В. Кирпичева и М.А. Михеева. Качественные и количественные характеристики тепло-ветровых процессов, формирующиеся в них, были изучены в метеорологической камере лаборатории по общепринятой методике НИИСФ, Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова

и Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института им. В.А. Бугаева.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение характеристики формирования местных бризовых ветров городов в соответствии с сочетанием острова тепла и острова прохлады позволило сформулировать модель организации городских бризов (табл. 1).

Местные непрерывные ветры, являясь самостоятельными воздушными течениями, возникают преимущественно при ослабленном поле ветра общей атмосферной циркуляции в результате термического возмущения инсолируемых и затененных деятель-

ных поверхностей территории городов, очагов тепла и прохлады. При развитии общециркуляционного фона интенсивность ветров местного происхождения постепенно ослабевает и ликвидируется.

Усредненное количество тепла, выделяемого энергоактивными деятельными элементами и поверхностями города (островами тепла) при активной инсоляции в летний период, можно выразить уравнением теплоотдачи в виде:

$$Q_r = \alpha_r F_r \Delta t,$$

где  $\alpha_r$  — средний коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> °С;  $F_r$  — усредненная площадь деятельной поверхности города, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  — усредненная разность температур поверхности и воздуха деятельного слоя города, °С.

Табл. 1. Модель формирования городских бризов

Table 1. Urban breeze model

№ п/п No.	Схема аэрации в сочетании островов тепла и прохлады Aeration pattern as a combination of heat and cool islands	Эпюра ветрового потока Wind flow diagram	Тепловой режим Thermal conditions	Стороны света Cardinal points								
				C N	CB NE	B E	ЮВ SE	Ю S	ЮЗ SW	З W	СЗ NW	
1			$t_1 > t_2$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2			$t_1 > t_2 > t_3$	++	+	+	+	++	++	++	++	++
3			$t_1 > t_2 > t_3$	+	+	++	++	++	++	++	++	+
4			$t_1 > t_2 > t_3$	++	+	+	+	+	+	+	++	++
5			$t_1 > t_2 > t_3$	++	++	++	++	++	++	++	++	+
6			$t_1 > t_2 > t_3$	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание: + — активные бризы; ++ — высокоактивные бризы.

Note: + — active breeze; ++ — highly active breeze.

При турбулентном течении ( $GrPr > 2 \cdot 10^7$ ), когда  $Nu \approx 0,136(GrPr)^{4/3}$  теплоотдачи:

$$Q_r = a^2 \Delta t^{4/3},$$

где  $a$  — характерный размер острова тепла.

В условиях города терморегулирующее значение крупных зеленых массивов, типа городских парков или плотно озелененных городских зон в сочетании с постройками проявляется в том, что они действуют в качестве создания местного проветривания за счет горизонтального градиента температуры термически контрастных островов тепла и прохлады.

Переходя к оценке развития местных микробризов, заметим, что они определяются горизонтальным градиентом температуры воздуха, который для удобства можно выразить через разность температур между энергоактивной деятельной поверхностью и зеленой зоной инсолируемой и теневой территории. В то же время можно утверждать, что условия для развития микробризовой циркуляции в городской территории тем предпочтительнее, чем выше контраст температуры между островами тепла и прохлады (табл. 2).

В итоге следует отметить, что результаты масштабных синхронных метеорологических исследований на городской территории позволили установить зависимость скорости местных ветров и их адвекции от разности температур городских островов тепла и прохлады (рис. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При инсоляции открытых городских территорий и структурных построений происходит нагрев энергоактивных искусственных деятельных поверхностей, над которыми формируются острова

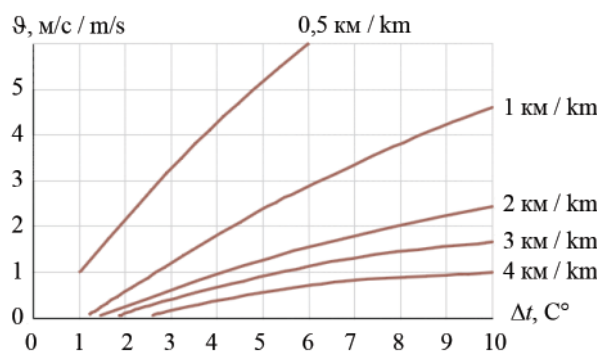


Рис. 1. Трансформация местных ветров при термической контрастности городских островов

Fig. 1. Transformation of local winds due to the thermal contrast of urban islands

тепла, в то же время на теневой от высотных зданий зоне и в зеленых массивах образуются прохладные острова, разница температуры воздуха между которыми составляет 6...10 °С, что обуславливает перемещение воздушных масс от прохладного острова к теплему на расстояние от нескольких метров (во внутригородских кварталах) до 2 км и более (между построенными и обжитыми жилыми, общественными, промышленными зонами, озелененными территориями) со скоростью 2,5...6 м/с.

Результаты проведенных исследований позволили определить возможность организации благоприятных локальных ветров и количественно оценить общие условия их возникновения путем выбора правильных микроклиматических и мезоклиматических факторов при планировании городских зон, проектировании зданий и сооружений. При этом условием механизма развития местных бризовых ветров должны быть следующие признаки:

Табл. 2. Разность температур воздуха Δt, °С, поверхности Δτ, °С, и относительной влажности воздуха Δφ, %, между озелененными и открытыми островами тепла территории города в полуденные часы, июль

Table 2. Difference between air Δt, °С, and surface Δτ, °С, temperatures and the relative air humidity Δφ, %, of landscaped and unprotected heat islands in the urban area at noon, July

Участки наблюдений / Observation areas	Δt, °С	Δτ, °С	Δφ, %
Ботанический сад / Botanic gardens	4,0...6,8	22...25	20
Центральный парк города / Central park	3,5...5,4	20...22	20
Сквер / Public garden	4...5,2	15...20	18...20
Территория, покрытая газоном / Lawn-covered area	0,5	10...14	2
Улицы, озелененная платаном / Street with plane trees	2,5...3,4	16...20	8...12
Двор озелененный / Landscaped yard	3...4,5	15...22	10...16
Двор неозелененный / Non-landscaped yard	—	—	—
Однорядная полоса насаждений / Single-row green area	1,5	12...19	4...7
Многорядная полоса насаждений / Multi-row green area	3...4	18...20	8...10

- распределение давления в приземном слое с горизонтальным составляющим движения атмосферного воздуха, не превышающим 3 м/с;
- частое повторение инверсионных процессов с ослаблением скорости атмосферного ветра;
- наличие достаточного температурного контраста между двумя соседствующими островами тепла и прохлады.

Подытоживая результаты аналитического анализа и проведенных комплексных исследований, представляется возможность сформулировать сле-

дующую классификацию модели естественной аэрации на макро-, мезо-, микро- и наноуровне городов (табл. 3).

Таким образом, определилось новое логическое направление для рационального использования энергии солнца для активизации ветров локального происхождения путем целенаправленного планирования городских территорий, объемно-пространственного и планировочного решений городских структур, благоустройства, озеленения территорий и архитектурно-конструктивного решения зданий.

Табл. 3. Классификация городских ветров

Table 3. Classification of urban winds

Местный ветер Local wind	Происхождение / Origin		Характер строения / Nature		Характеристика ветра Wind characteristics
	Особенность тектоники Features of the tectonics	Основа возмущения циркуляции Circulation origin	Пространственная изменчивость Spatial variability	Временная изменчивость Temporary variability	
Макро-бриз городской Urban macro-breeze	Город и пригород Town and suburbs	Периодический градиент температуры в системе «город – пригород» Periodic temperature gradient in the “Town–Suburb” system	Обращение направления с высотой Correlation between direction and altitude	Суточная периодичность направления и скорости Daily frequency of direction and speed	Дующий днем и ночью от пригорода к городу Blowing day and night from suburb to city
Мезобриз городских структурных зон Mezobreeze of structural urban areas	Энергоактивные деятельные поверхности островов тепла и прохлады Energy-active surfaces of heat and cool islands	Периодический градиент температуры в системе «остров тепла – остров прохлады» Periodic temperature gradient in “heat island – cool island” system	Обращение направления с высотой Correlation between direction and altitude	Суточная периодичность направления и скорости Daily frequency of direction and speed	Дующий периодически или непрерывно со стороны прохладной зеленой зоны в сторону энергоактивной поверхности Blowing periodically or continuously from the side of the cool green zone towards the energy-active surface
Микро-бриз городских территорий Micro-breeze of urban areas	Инсолируемые и теневые фасады Facades exposed to insolation and shady facades	Периодический градиент температуры в системе «облучаемые – теневые фасады, энергоактивные – прохладные острова» Periodic temperature gradient in the “Facades exposed to insolation – shady facades, energy active – cool islands” system	Обращение направления с высотой Correlation between direction and altitude	Суточная периодичность направления и скорости Daily frequency of direction and speed	Дующий периодически со стороны прохладного в сторону теплого острова и помещения Blowing periodically from the cool side towards the warm island and room
Нанобриз городских территорий Nanobreeze of urban areas	Энергоактивные и прохладные покрытия, помещения с контрастной температурой Energy active and cool coatings, premises having contrasting temperatures	Периодический градиент температуры в системе «энергоактивные – прохладные острова» Periodic temperature gradient in the “Energy active – cool islands” system	Обращение направления с высотой Correlation between direction and altitude	Суточная периодичность направления и скорости Daily frequency of direction and speed	Формирующийся между термически контрастными площадями, между разноинсолируемыми и тенивыми помещениями зданий Forming between thermally contrasting areas, between different insolation and shadow rooms of buildings

Изучение естественной аэрации городских территорий комплексными теоретическими и экспериментальными исследованиями на физических моделях, натурными наблюдениями метеорологических факторов позволило сформулировать физико-математическую модель процессов естественной аэрации городов и их застройки в доминирующих условиях солнечной радиации и штилевых условиях местности.

Данная модель является основой для предварительного прогнозирования сформировавшихся местных ветров термического происхождения, которые могут быть эффективно использованы для оздоровления воздушной среды на стадии проектирования планировочных схем и планирования застройки урбанизированных территорий с условиями жаркого штилевого климата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Giyasov A.I.* Modeling of aeration of buildings and facilities erected in a mountain valley // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022068
2. *Смирнов Ю.Н.* О влиянии природно-климатических условий на формирование архитектурной среды в странах Центральной Азии и Казахстане: аэрация городов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2018. Т. 18. № 8. С. 151–155.
3. *Гиясов А., Баротов Ю.Г.* Тепловое состояние человека в застройке городов с жарким условием климата // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 4 (44). С. 151–157.
4. *Rizk A.A., Henze G.P.* Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1711–1718. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.005
5. *Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К.* Город, архитектура, человек и климат. М.: Архитектура-С, 2007. 344 с.
6. *Оленьков В.Д., Пронина А.А.* Оценка аэрационного режима города при решении проблем градостроительной безопасности // Градостроительство. 2014. № 6 (34). С. 37–41.
7. *Княжева Е.И., Бродягин В.А.* Санитарно-гигиенический комфорт населения как один из факторов устойчивого развития городской среды // Дизайн и архитектура: синтез теории и практики: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Краснодар, 2018. С. 152–156.
8. *Реттер Э.И.* Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: Стройиздат, 1984. 294 с.
9. *Лифанов И.К., Гутников В.А., Скотченко А.С.* Моделирование аэрации в городе. М.: Диалог-МГУ, 1998. 134 с.
10. *Белостоцкий А.М., Афанасьева И.Н., Ланцова И.Ю.* Оценка пешеходной комфортности на основе численного моделирования ветровой аэродинамики зданий в окружающей застройке // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. Т. 15. № 2. С. 24–39. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-2-24-39
11. *Zielonko-Jung K.* The influence of the urban design on the air exchange in cities. selected problems in polish reality // 5th SGEM International Multidisciplinary Scientific Conferences on SOCIAL SCIENCES and ARTS SGEM2018, Urban Planning, Architecture and Design. 2018. DOI: 10.5593/sgemsocial2018/5.2/s19.041
12. *Никулин В.А.* О некоторых вопросах архитектурно-строительной аэродинамики // Вестник КИГИТ. 2013. № 3. С. 4–27.
13. *Айкашев В.Д.* Влияние аэрационного режима на уровень загрязнения воздушного бассейна городов // Сб. тр. Южно-Уральского государственного университета. 2018. № 3. С. 7–11.
14. *Prusov V.A., Doroshenko A.Y., Sologub T.A.* Atmospheric processes in urban area elements // Cybernetics and Systems Analysis. 2019. Vol. 55. Issue 1. Pp. 90–108. DOI: 10.1007/s10559-019-00115-w
15. *Гиясов А., Сокольская О.Н.* Формирование городской застройки с учетом экологических факторов атмосферной среды в жарких маловетренных и штилевых климатических условиях. Краснодар: КубГТУ, 2016. 140 с.
16. *Поддаева О.И., Кубенин А.С., Чуринов П.С.* Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: НИУ МГСУ, 2015. 89 с.
17. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge University Press, 2017. 525 p. DOI: 10.1017/9781139016476
18. *Дуничкин И.В., Жуков Д.А., Золотарев А.А.* Влияние аэродинамических параметров высотной застройки на микроклимат и аэрацию городской среды // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 39–41.
19. *Балакин В.В.* Регулирование аэрационного режима уличных каньонов приемами планировки и застройки // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 108–118. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.5.108-118
20. *Valger S.A., Fedorova N.N., Fedorov A.V.* Numerical study of interference effects in atmospheric air flow past a group of intricately shaped buildings // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Vol. 24. Issue 1. Pp. 35–44. DOI: 10.1134/s0869864317010048

Поступила в редакцию 30 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 25 августа 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Адхам Иминжанович Гиясов** — доктор технических наук, профессор кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979847; adham52@mail.ru;

**Тимур Батырович Гиясов** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 666.228.1488@mail.ru.

## REFERENCES

1. Giyasov A.I. Modeling of aeration of buildings and facilities erected in a mountain valley. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022068
2. Smirnov Yu.N. On the influence of climatic conditions on the formation of the architectural environment in the countries of Central Asia and Kazakhstan: aeration of cities. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2018; 18(8):151-155. (rus.).
3. Giyasov A., Barotov Yu.G. The thermal state of a person in urban development with a hot climate condition. *Polytechnic Bulletin. Engineering Research Series*. 2018; 4(44):151-157. (rus.).
4. Rizk A.A., Henze G.P. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates. *Energy and Buildings*. 2010; 42(10):1711-1718. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.005
5. Myagkov M.S., Gubernskiy Yu.D., Konova L.I., Litskevich V.K. *City, architecture, people and climate*. Moscow, Architecture-S, 2007; 344. (rus.).
6. Olenkov V.D., Pronina A.A. Assessment of the aeration regime of the city when solving problems of urban planning safety. *Urban planning*. 2014; 6(34):37-41. (rus.).
7. Knyazheva E.I., Brodyagin V.A. Sanitary and hygienic comfort of the population as one of the factors of sustainable development of the urban environment. *Design and architecture: a synthesis of theory and practice: collection of scientific papers II International Scientific and Practical Conference*. Krasnodar, 2018; 152-156. (rus.).
8. Retter E.I. *Architectural and construction aerodynamics*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 294. (rus.).
9. Lifanov I.K., Gutnikov V.A., Skotchenko A.S. *Modeling of aeration in the city*. Moscow, Dialog-MGU, 1998; 136. (rus.).
10. Belostotsky A.M., Afanasyeva I.N., Lantsova I.Yu. Assessment of pedestrian comfort based on numerical modeling of wind aerodynamics of buildings in the surrounding buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(2):24-39. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-2-24-39 (rus.).
11. Zielonko-Jung K. The influence of the urban design on the air exchange in cities. selected problems in polish reality. *5th SGEM International Multidisciplinary Scientific Conferences on SOCIAL SCIENCES and ARTS SGEM2018, Urban Planning, Architecture and Design*. 2018. DOI: 10.5593/sgemsocial2018/5.2/s19.041
12. Nikulin V.A. On some issues of architectural and construction aerodynamics. *KIGIT Bulletin*. 2013; 3:4-27 (rus.).
13. Aikashev V.D. Influence of the aeration regime on the level of air pollution in cities. *Proceedings of the South Ural State University*. 2018; 3:7-11. (rus.).
14. Prusov V.A., Doroshenko A.Y., Sologub T.A. Atmospheric processes in urban area elements. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019; 55(1):90-108. DOI: 10.1007/s10559-019-00115-w
15. Giyasov A., Sokolskaya O.N. *Formation of urban development taking into account the environmental factors of the atmospheric environment in hot, low wind and calm climatic conditions*. Krasnodar, KubSTU, 2016; 140. (rus.).
16. Poddaeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Architectural and construction aerodynamics*. Moscow, NRU MGSU, 2015; 89. (rus.).
17. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*. Cambridge University Press, 2017; 525. DOI: 10.1017/9781139016476
18. Dunichkin I.V., Zhukov D.A., Zolotarev A.A. Influence of the high-rise housing aerodynamic parameters on the microclimate and aeration of the urban environment. *Industrial and Civil Construction*. 2013; 9:39-41. (rus.).
19. Balakin V.V. Street Canyon Ventilation Control by Proper Planning and Development. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 5:108-118. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.5.108-118 (rus.).
20. Valger S.A., Fedorova N.N., Fedorov A.V. Numerical study of interference effects in atmospheric air flow past a group of intricately shaped buildings. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017; 24(1):35-44. DOI: 10.1134/s0869864317010048

Received July 30, 2020

Adopted in revised form on August 13, 2020.

Approved for publication on August 25, 2020.

**BIONOTES:** **Adham I. Giyasov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of design of buildings and facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 979847; adham52@mail.ru;

**Timur B. Giyasov** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 666.228.1488@mail.ru.

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

УДК 534.011:624.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1372-1389

## Исследования скорости поперечных волн в грунтоцементе при анизотропном напряженном состоянии

А.З. Тер-Мартirosян, Е.С. Соболев

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Преобразование строительных свойств оснований методом глубинного грунтосмешения позволяет возводить здания и сооружения на площадках со слабыми грунтами. Как правило, неблагоприятные инженерно-геологические условия сопровождаются наличием динамических воздействий на проектируемые здания и сооружения. Задачей настоящих исследований является прогноз изменения механических свойств грунтов после преобразования строительных свойств основания. Объект настоящего исследования — грунтоцемент.

**Материалы и методы.** Результаты специальных лабораторных испытаний проб грунтоцементов методом малоамплитудных крутильных колебаний в резонансной колонке в режиме анизотропного трехосного сжатия позволили оценить влияние дополнительной вертикальной нагрузки на скорость распространения упругих поперечных волн. В работе представлено описание метода исследований, выполнен обзор оборудования, на котором выполнялись специальные лабораторные испытания. Испытания проводились на образцах грунтоцемента ненарушенной структуры при естественной влажности. Анизотропное напряженное состояние образцов грунтоцемента в ходе трехосных испытаний в резонансной колонке было обусловлено особенностями работы основания проектируемого сооружения.

**Результаты.** В настоящем исследовании лабораторные испытания проводились в два этапа. На первом этапе оценивалось влияние вертикального напряжения на скорость распространения поперечных волн. Получены корреляционные зависимости между скоростью сдвиговых волн и отношением вертикальных и боковых напряжений. На втором этапе лабораторных испытаний было выполнено определение скорости распространения поперечных волн при различных комбинациях бокового  $\sigma_3$  и вертикального  $\sigma_1$  напряжений. Результаты второго этапа предназначены для оценки влияния анизотропного напряженного состояния и прогнозирования скоростей поперечных волн при уровнях напряжений, ожидаемых на площадке размещения проектируемых тяжелых сооружений.

**Выводы.** Полученные результаты позволили дать оценку влияния боковых и вертикальных напряжений в режиме трехосного сжатия на изменение скорости поперечных волн. Установлено, что при равных значениях боковых напряжений  $\sigma_3$  увеличение вертикального напряжения  $\sigma_1$  в 7 раз приводит к росту скорости поперечных волн в грунтоцементе  $V_s$  на 15 %. Вместе с тем при увеличении отношения вертикальных напряжений к боковым  $\sigma_1/\sigma_3$  в 15 раз наблюдалось увеличение скорости поперечных волн на 11 %. Отмечается, что, чем меньше была исходная величина бокового напряжения  $\sigma_3$ , тем больше увеличение скорости поперечных волн  $V_s$  в процессе испытаний. Корреляционные зависимости, представленные в настоящей работе, можно использовать для оценки влияния анизотропного состояния в первом приближении (для предварительных расчетов) при проектировании тяжелых сооружений на грунтоцементных основаниях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** динамические свойства грунтов, глубинное грунтосмешение, скорость упругих поперечных волн, анизотропное напряженное состояние, дополнительная пригрузка, резонансная колонка, лабораторные исследования

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Исследования скорости поперечных волн в грунтоцементе при анизотропном напряженном состоянии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1372–1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1372-1389

## Studies of the shear wave velocity in soil cement under the anisotropic stress state

Armen Z. Ter-Martirosyan, Evgeniy S. Sobolev

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Deep soil mixing, that alters construction properties of foundations, allows to construct buildings and structures on the sites that have loose soils. As a rule, adverse geotechnical conditions are accompanied by dynamic forces that affect designed buildings and structures. The objective of these studies is to predict changes in mechanical properties of soils that follow the alteration of structural properties of a foundation. Soil cement is the focus of this study.

**Materials and methods.** The findings of special laboratory tests of soil cement samples using the method of low amplitude torsional vibrations inside a resonant column in the anisotropic triaxial compression mode allowed to assess the effect of the supplementary vertical load on the velocity of shear elastic wave propagation. The co-authors present a description of the research method and provide an overview of the equipment used to conduct special laboratory tests. Tests were performed on undisturbed soil cement samples that had a natural water content. The anisotropic stress state of soil cement samples exposed to triaxial tests in the resonant column was caused by special behaviour features of the foundation.

**Results.** In this study, laboratory tests had two stages. At the first stage, the effect of the vertical stress on the velocity of shear wave propagation was assessed. Correlation dependences between the shear wave velocity and the ratio of vertical and lateral stresses were obtained. At the second stage, shear wave propagation velocity values were identified at various combinations of lateral  $\sigma_3$  and vertical  $\sigma_1$  stresses. The results of the second stage are designated for the assessment of the effect of the anisotropic stress state and the projection of shear wave velocities at the stress levels anticipated on the site that will accommodate designed heavy structures.

**Conclusions.** The findings allow to assess the effect of lateral and vertical stresses on changes of shear wave velocities in the triaxial compression mode. It was identified that at equal values of lateral stresses  $\sigma_3$ , a 7-fold vertical stress  $\sigma_1$  increase leads to a 15 % increase in the shear wave velocity in soil cement  $V_s$ . At the same time, an increase in the ratio of vertical to lateral stresses  $\sigma_1/\sigma_3$  by a factor of 15 causes an 11 % increase in the shear wave velocity. It is noted that the smaller the initial value of lateral stress  $\sigma_3$ , the higher the rise in the shear wave velocity  $V_s$  in the course of testing. Correlation dependences, presented in this study, can be used to assess the effect of the anisotropic state as the first approximation (for preliminary calculations) in the design of heavy structures on soil cement foundations.

**KEYWORDS:** dynamic properties of soils, deep soil mixing, shear elastic wave velocity, anisotropic stress state, additional surcharging, resonant column, laboratory tests

**FOR CITATION:** Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. Studies of the shear wave velocity in soil cement under the anisotropic stress state. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1372-1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1372-1389 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Возведение промышленных и гражданских зданий и сооружений, передающих существенные нагрузки на основания, выполняется, как правило, на слабосжимаемых и прочных грунтах. В процессе инженерных изысканий и проектирования объекты высотного строительства, тяжелые промышленные здания, такие как теплоэнергетические и гидротехнические сооружения, нуждаются в особых методах определения физико-механических свойств грунтов. Площадка размещения таких сооружений зачастую выбирается исходя из оптимального соотношения между конструктивно-технологическими (наличие источников технической воды, дорожная и электрическая сеть, социальная доступность, экономическая целесообразность и т.п.) и инженерно-геологическими особенностями (слабые грунты, неблагоприятные геологические и инженерно-геологические процессы, сейсмическая активность и т.п.). Геотехнический прогноз зданий и сооружений повышенной ответственности обязательно включает в себя оценку динамических воздействий, так как в противном случае повреждения, полученные в течение жизненного цикла таких объектов, могут привести к крайне тяжелым техническим, экономическим и, самое опасное, социальным последствиям. Динамическая реакция грунтового основания обусловлена наличием и мощностью толщи слабых нестабилизированных глинистых отложений, водонасыщенных пылеватых песков, залеганием вблизи поверхности подземных вод и близостью тектонических разломов.

Надежность и долговечность эксплуатации особо сложных зданий и сооружений достигается, в частности, за счет решения одной из основопо-

лагающих геотехнических задач — ограничения совместных деформаций основания и сооружения. Величина этих совместных деформаций не должна превышать предельно допустимой величины в зависимости от конструктивных особенностей здания. В России предельно допустимые здания совместных деформаций основания и сооружения регламентируются нормативными техническими документами: СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», МДС 50-1.2007 «Проектирование и устройство оснований, фундаментов и подземных частей многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов», СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений», ПИ-НАЭ-5.10-87 «Основания реакторных отделений атомных станций». В международной практике используются европейские нормативные документы (CEN EN 1997-1-2004 Eurocode 7: Geotechnical design, CEN EN 1998-5: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance), американские нормативные документы (IBC 2012/15, ASCE/SEI 7-10) и многие другие. Во многих случаях для того, чтобы исключить перемещение зданий и сооружений на альтернативные площадки, при этом соблюдая предельно допустимые величины деформаций и обеспечивая динамическую устойчивость, необходимо выполнить усиление грунтов основания.

Сегодня разработано и используется огромное количество специальных технологий усиления и стабилизации слабых грунтовых оснований [1]. В настоящей работе рассматриваются пробы грунтоцементов, отобранные в процессе инженерных изысканий после преобразования строительных свойств методом глубинного грунтосмещения (ГГС) на площадке проектируемого объекта энергетической промышленности. Технология ГГС в иностранной литера-

туре именуется deep soil mixing (DSM) [2, 3]. Существуют только зарубежные нормативные документы, регламентирующие данный метод, в частности европейский стандарт BS EN 14679:2005. Метод усиления оснований ГГС улучшает физико-механические свойства за счет перемешивания грунтов и цемента (или иных вяжущих) для образования грунтоцементной смеси (soil mix или cement-soil). Полученный композитный материал по своим свойствам близок к бетону, обладает значительно большей прочностью и сжимаемостью, меньшей водопроницаемостью, чем необработанный грунт. Параметры грунтоцемента зависят от типа вяжущего и соотношения «грунт – вяжущее – вода». Альтернативные технологии инъектирования — струйная цементация (jet grouting) или армирования — свайное основание проигрывают ГГС по объему используемого вяжущего на единицу объема преобразованного грунта.

Благодаря существенному улучшению физико-механических свойств грунтов метод ГГС находит все большее применение, являясь более экономичным и эффективным аналогом традиционных способов замены толщ слабых грунтов или использования фундаментов глубокого заложения. При этом тяжелые сооружения энергетической промышленности не только могут располагаться на площадках с возможными динамическими воздействиями как природного, так и техногенного характера, но и сами являются источниками таких воздействий за счет происходящих внутри технологических процессов. Расчет и прогноз взаимодействия сооружения и основания, преобразованного по технологии ГГС, с учетом динамических воздействий является на настоящий момент не до конца изученной и актуальной геотехнической проблемой.

Проектирование оснований динамически устойчивых сооружений базируется на спектральном методе расчета (в соответствии с ПиНАЭ-5.10-87). Основные расчетные параметры оснований объектов энергетической промышленности при динамическом (в частности, сейсмическом) воздействии: осадка  $S_{eq}$ , горизонтальные перемещения  $U_{eq}$  и крен  $i_{eq}$ . Указанные виды деформаций обуславливаются соотношением динамических сил  $P_i$  и жесткости основания  $K_i$  на контакте грунта и сооружения. Динамическая жесткость  $K_i$  зависит от геометрии подошвы фундамента проектируемого сооружения и величин скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн в грунте основания.

В существующей практике проектирования скорости продольных и поперечных волн пород в полевых условиях определяются с помощью наблюдений с поверхности и во внутренних точках среды методами преломленных волн (МВП), вертикальным сейсмическим профилированием (ВСП) и сейсмическим просвечиванием (СП) в соответствии с СП 11-105–97. Однако представляется достаточно трудоемким, используя указанные методы, оценить изменение фи-

зико-механических свойств грунтов вместе с изменением напряженно-деформированного состояния основания под возведенным сооружением большой площади. Кроме того, несмотря на некоторое преимущество в точности определения динамических параметров грунтов полевыми методами, следует отметить неудобство использования полевого оборудования и проведения геофизических исследований на действующем теплоэнергетическом или гидротехническом режимном объекте.

В лабораторных условиях основным методом являются ультразвуковые измерения на образцах в соответствии с ГОСТ 17624–2012. Однако этот метод ограничен применением высокоточного специального оборудования, мало распространенного в грунтовых лабораториях. Альтернативным методом лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн в грунте является метод малоамплитудных крутильных колебаний. Оборудование для реализации этого метода позволяет определять большее количество необходимых параметров при исследованиях и, следовательно, является более универсальным [4].

Цель настоящего исследования — изучить закономерности изменения скорости распространения упругих поперечных волн  $V_s$  в образцах грунтоцемента. Задача исследования — получить корреляционную зависимость скорости поперечных волн  $V_s$  от действующих вертикальных  $\sigma_1$  и боковых  $\sigma_3$  напряжений в условиях анизотропного трехосного сжатия путем лабораторных испытаний в резонансной колонке.

Актуальность поставленной цели объясняется следующим. Опыт проектирования на преобразованных основаниях и анализ опубликованных работ отечественных и зарубежных исследователей по испытаниям образцов преобразованных грунтов показывают некоторое увеличение скорости распространения упругих волн в преобразованных грунтах (грунтоцементных) с увеличением действующих напряжений (в том числе при анизотропном напряженном состоянии, когда вертикальные напряжения  $\sigma_1$  превышают боковые напряжения  $\sigma_3$ ). Увеличение скоростей распространения упругих волн, в свою очередь, приводит к увеличению динамической жесткости основания  $K_p$ , что в конечном итоге позволяет снизить деформации при динамических воздействиях. Это имеет непосредственный экономический эффект при рациональном подходе к проектированию и конструированию подземных конструкций тяжелых промышленных сооружений с динамическими нагрузками.

Цементация грунтов методом ГГС оказывает влияние на микромеханическое взаимодействие частиц, из которых состоит грунтовый массив. В работе A.L. Fernandez и J.C. Santamarina [5] отмечается, что увеличение содержания вяжущего вещества в общем объеме раствора увеличивает толщину це-

ментных пленок, окружающих частицы грунта при цементации. Возникает эффект увеличения площади контактов между твердыми частицами грунта [6, 7]. В этом случае следует ожидать и увеличения скорости распространения поперечных волн  $V_s$ . Анизотропное напряженное состояние должно способствовать возникновению дополнительных контактных напряжений между частицами, что, в свою очередь, дополнительно увеличит и скорость распространения поперечных волн.

Согласно исследованиям J.C. Santamarina и G. Cascante [8], эмпирическая зависимость между скоростью поперечных волн и изотропным напряжением может быть выражена как:

$$V_s = A\sigma_0^{b/2}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $b$  — постоянные значения.

В случае анизотропного нагружения [9] следует учитывать как напряжение в направлении распространения волны  $\sigma_1$ , так и боковое давление  $\sigma_3$ , как представлено в уравнении (2):

$$V_s = A \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^\alpha \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^\beta, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — постоянные значения.

Для изотропного напряженного состояния уравнение (2) сводится к формуле (1). Указанные константы могут быть определены в множественной переменной линейной регрессии путем логарифмирования обеих частей уравнения (2). Для зернистых материалов (таких как песок) отмечается, что скорость сдвиговых волн в основном определяется средним напряжением в плоскости поляризации, когда отношение напряжений не превышает 3 [8].

Для больших значений отношения напряжений  $\sigma_1$  к  $\sigma_3$  никакой корреляции найдено не было.

Несмотря на то что значения постоянных коэффициентов (т.е.  $b$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ ) необходимо определять для каждого материала, существуют некоторые рекомендации по их диапазонам. Например, для сплошной среды значение  $b$  приближается к нулю, что означает, что состояние напряжения оказывает минимальное влияние на скорость волны. В зернистых материалах эта величина указана в диапазоне от 0,25 до 0,75 [8]. Для преобразованных грунтов ожидается, что это значение коэффициента  $b$  должно быть меньше 0,25.

N. Chiara и K.H. Stokoe II [10] исследовали влияние различных факторов на измерения скорости поперечной волны в лабораторных условиях. Они объясняют несоответствие между лабораторными и полевыми измерениями скорости поперечной волны влиянием четырех основных факторов:

- 1) различная прочность в естественных условиях и после отбора грунта;
- 2) число пластичности грунта;
- 3) глубина отбора пробы грунта;
- 4) эффективное среднее боковое давление в естественных условиях.

В работе [11] количественно оценено влияние этих четырех факторов в одном уравнении (или поправочном коэффициенте), чтобы прогнозировать соотношение между скоростью поперечной волны, измеренной в полевых условиях и измеренной в лаборатории. В своем исследовании эти авторы также признают, что увеличение глубины образца приводит к увеличению эффективного среднего бокового давления.

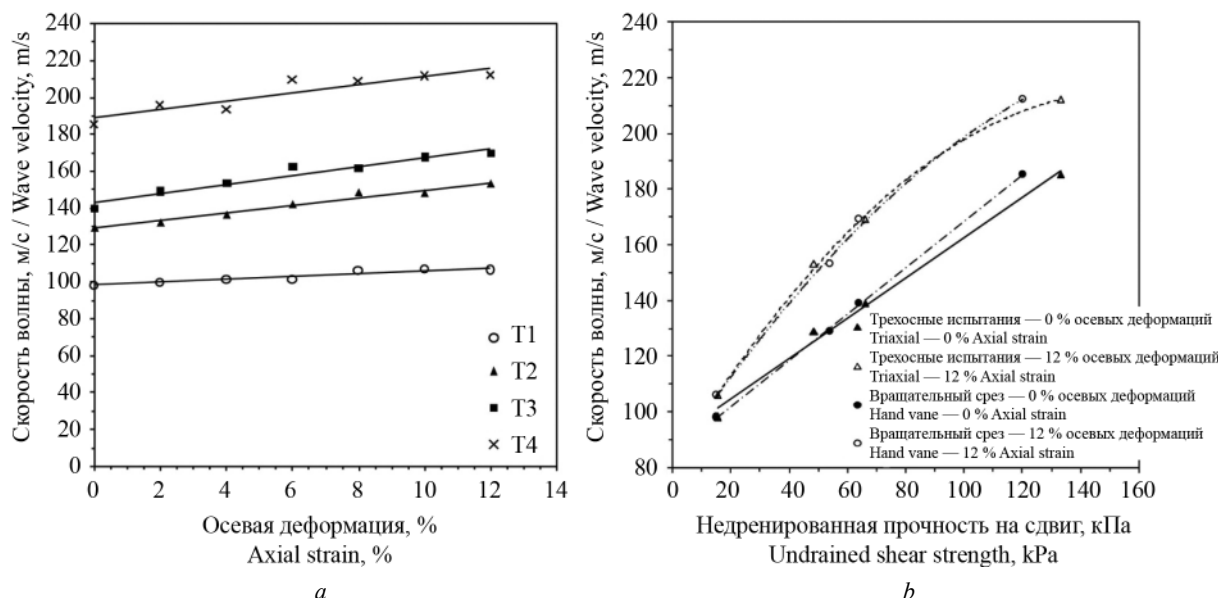


Рис. 1. Корреляционные зависимости осевых деформаций в режиме трехосного сжатия (a) и недренированной прочности на сдвиг (b) от скорости поперечной волны [12]

Fig. 1. Correlation dependencies of axial deformations in the triaxial compression mode (a) and undrained shear strength (b) on the shear wave velocity [12]

Исследования [10] не позволили выполнить количественную оценку каждого из указанных выше факторов. Таким образом, окончательная формула, представленная в их исследовании, является только функцией скорости, измеренной в лаборатории. Можно предположить, что влияние прочности образца, глубины отбора и бокового давления в грунтовом массиве могут быть объединены в один фактор — влияние анизотропного напряженного состояния в грунтовом массиве.

Результаты исследований зависимости прочности модифицированных и обычных грунтов от напряженного состояния [13] показывают, что изменение модуля сдвига при малых деформациях в зависимости от напряженного состояния аналогично изменению модуля сдвига при больших деформациях.

Опытные данные, содержащиеся в работах A.S.A. Rashid и J.A. Black [12], хорошо доказывают взаимосвязь между ростом скорости поперечных волн и увеличением осевых деформаций в режиме трехосного сжатия (рис. 1, а). Дополнительно в работах [12, 14] представлены результаты тех же экспериментов, показывающие пропорциональный рост скорости упругих поперечных волн вместе с увеличением недренированной прочности на сдвиг (рис. 1, b).

R. Sharma с коллегами [15] в 2011 г. выполнял исследования грунтоцемента на основе преобразованного песчаного грунта. Выполненные эксперименты установили максимальное значение модуля

сдвига при малых деформациях  $G_0$  при полной мобилизации сдвиговой прочности. Полученный результат позволяет использовать параметр скорости поперечных волн  $V_s$  как маркер изменения физико-механических свойств в преобразованных грунтах в период поэтапного устройства насыпей грунтовых плотин, полотен железных и автомобильных дорог, а также фундаментов тяжелых сооружений. Помимо этого важного обстоятельства, в работе R. Sharma [15] установлено возрастание скорости поперечных волн  $V_s$  с ростом дополнительных эффективных вертикальных напряжений (рис. 2).

В работе M. Cha и G.-C. Cho для песчаных грунтов исследована эмпирическая взаимосвязь между скоростью поперечной волны  $V_s$  и коэффициентом пористости  $e$  при различных величинах вертикального напряжения  $\sigma_1$  (рис. 3). На основе полученных экспериментальных данных [16] приводится зависимость между скоростью поперечных волн  $V_s$  и эффективным напряжением  $\sigma'_v$  при минимальном  $e_{min}$  и максимальном  $e_{max}$  значениях коэффициентов пористости:

$$V_{s_{e_{min}}} = 181 \left( \frac{\sigma'_v}{1 \text{ кПа}} \right)^{0,145}, \quad V_{s_{e_{max}}} = 55 \left( \frac{\sigma'_v}{1 \text{ кПа}} \right)^{0,241}. \quad (3)$$

Структура формулы (3) соответствует работам J.C. Santamarina и G. Cascante и повторяет приведенную ранее формулу (1). Скорость сдвиговых волн возрастает с увеличением уровня напряжений и уменьшением доли пустот в материале. Выполненные исследования позволяют прогнозировать

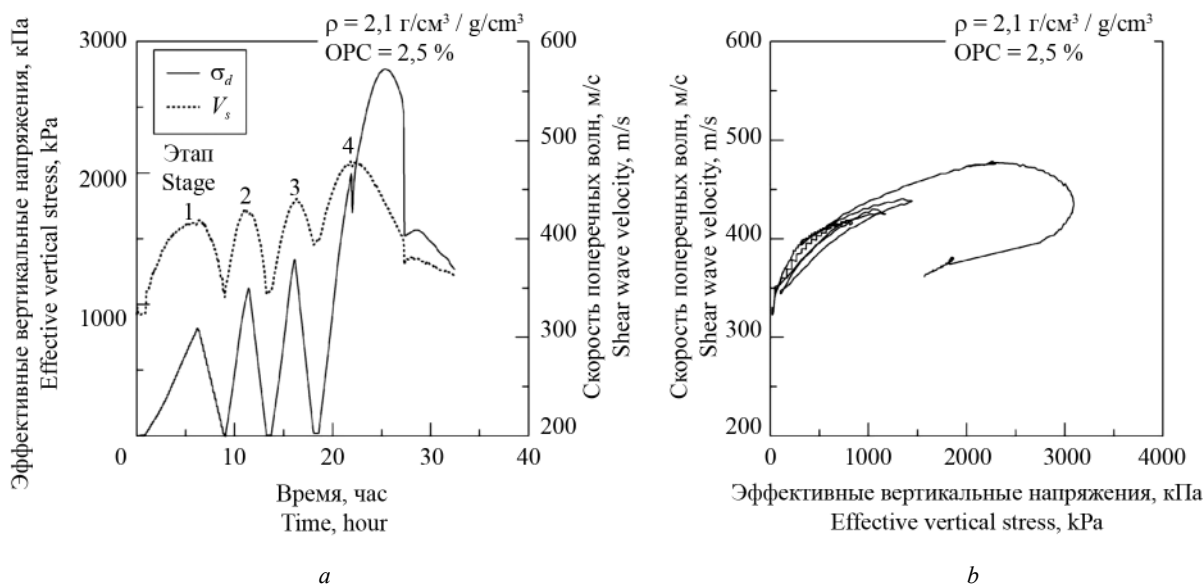


Рис. 2. Лабораторные исследования грунтоцемента на основе песка (плотность  $\rho = 2,1 \text{ г/см}^3$ ) в условиях трехосного сжатия: а — изменение скорости поперечной волны и эффективного вертикального напряжения во времени; б — зависимость скорости прохождения поперечных волн от эффективного вертикального напряжения; OPC — содержание портландцемента [15]

Fig. 2. Laboratory testing of sand-based soil cement (density  $\rho = 2.1 \text{ г/см}^3$ ) exposed to triaxial compression: а — alteration of the shear wave velocity and effective vertical stress over time; б — dependence of the shear wave propagation velocity on the effective vertical stress; PCC — Portland cement content [15]

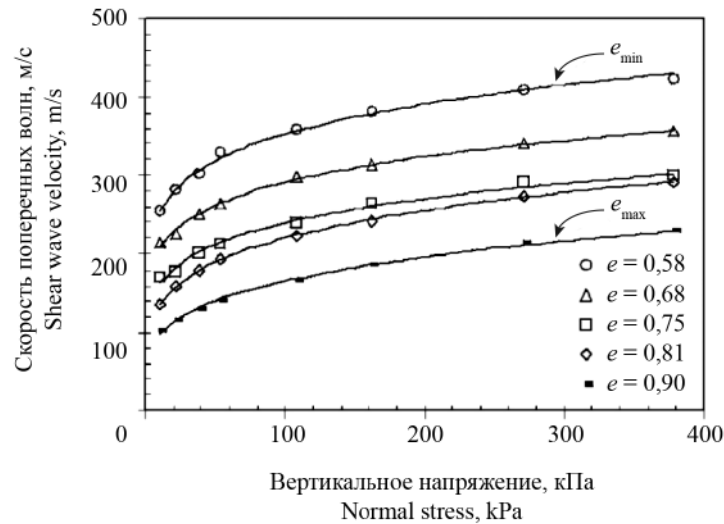


Рис. 3. Зависимость скорости поперечных волн  $V_s$  от действующего вертикального напряжения  $\sigma_1$  для образцов с различным коэффициентом пористости  $e$  [17]

Fig. 3. Dependence of the shear wave velocity  $V_s$  on the effective vertical stress  $\sigma_1$  for samples with different porosity ratio  $e$  [17]

изменение коэффициента пористости, предполагая, что изменение скорости поперечной волны, м/с, от минимального  $V_{s,min}$  до максимального  $V_{s,max}$  значения линейно между максимальными  $e_{max}$  и минимальными  $e_{min}$  значениями коэффициента пористости (д.е.). Может быть вычислен фактический коэффициент пористости  $e_{field}$  из фактической скорости сдвиговой волны  $V_{s,field}$  следующим образом:

$$e_{field} = e_{max} - (e_{max} - e_{min}) \frac{V_{s,field} - V_{s,max}}{V_{s,min} - V_{s,max}}. \quad (4)$$

Краткий обзор наиболее актуальных работ по теме исследования показывает убедительную зависимость между скоростью распространения поперечных волн  $V_s$  и изменением напряженного состояния образцов грунтоцемента в условиях лабораторных испытаний. Вероятно, данная связь обусловлена изменением физико-механических характеристик грунтов в процессе приложения нагрузки, особенно ее вертикальной составляющей  $\sigma_1$ . Существенным недостатком указанных работ является отсутствие связи с проектированием какого-либо строительного объекта, что затрудняет построение корреляционных зависимостей. Ведь именно использование таких зависимостей на предварительных этапах проектирования, до проведения непосредственных испытаний проб грунтов с площадки строительства, позволяет оценить экономическую эффективность и технологическую сложность реализуемого проекта. Из выполненного краткого обзора можно сделать еще одно важное обобщение: использование технологии преобразования строительных свойств основания методом ГТС может применяться в качестве способа управления дина-

мическими свойствами грунтов на участках с высокими динамическими нагрузками [4].

Метод глубинного грунтосмещения и работа оснований зданий и сооружений на таком основании при динамических воздействиях рассмотрены в публикациях Т.Т. Абрамовой [18, 19] и Е.А. Вознесенского [20].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Под анизотропным напряженным состоянием в процессе испытаний будем понимать различные значения бокового и вертикального напряжений, которые испытывает образец грунта в процессе работы реального основания сооружения. Значения данных напряжений, принятые в настоящей работе, получены путем математического моделирования в геотехническом программном комплексе, разработанном Plaxis BV. Моделирование учитывает различные стадии строительства и эксплуатации проектируемого сооружения энергетической промышленности. Моделирование показывает, что в процессе работы основания возникает существенная анизотропия напряженного состояния, особенно после окончания возведения сооружения, так как давление под подошвой тяжелых сооружений превышает природное давление окружающего грунта. Для имитации полевых условий на различных этапах строительства в PLAXIS Foundation 3D был выполнен анализ для определения напряженного состояния. Значения принимались в трех областях: под центром загруженной площадки, между центром и угловой точкой, под углом загруженной площадки. Кроме того, в каждой из указанных точек напряжения регистрировались на трех значениях глубин, м, от подошвы загруженной площадки:  $-1,0$ ,  $-10,0$  и  $-18,0$ .

Зона грунтового основания, преобразованная по методу глубинного грунтосмещения, состояла из нескольких инженерно-геологических элементов. Однако при анализе экспериментальных данных предполагалось, что в результате преобразования массив грунтоцемента будет иметь одинаковые значения скорости поперечной волны, за исключением влияния анизотропии напряжений.

Поэтому все точки данных из программы лабораторных испытаний используются в одной серии регрессионных анализов, и не проводится различий в глубине, на которой была взята проба. Важно отметить, что в ходе лабораторных испытаний все образцы были испытаны при различных уровнях напряжений, что позволяет придерживаться согласованных напряженных состояний. Такой анализ позволит получить только одно уравнение для всего объема преобразованного основания.

Лабораторные испытания проб грунтоцементов в форме цилиндров диаметром 83 мм и высотой 166 мм для определения скоростей поперечных волн  $V_s$  выполнялись методом малоамплитудных крутильных колебаний в резонансной колонке (рис. 4) в режиме консолидированно-недренированного трехосного сжатия с возможностью создания различных вертикальных  $\sigma_1$  и боковых  $\sigma_3$  напряжений согласно ГОСТ Р 56353–2015 (зарубежным аналогом которого является американский стандарт ASTM D4015-15e1).

Испытания проводились на образцах грунтоцементов (рис. 5), отобранных на участке размещения проектируемого сооружения теплоэнергетической промышленности. Проектом предусмотрено возведение тяжелого сооружения с дополнительным давлением под подошвой плитного фундамента около 0,6 МПа. До преобразования строительных свойств грунтов методом ГГС грунты представляли собой пески, мелкие и пылеватые аллювиального проис-

хождения. При глубинном грунтосмещении в качестве вяжущего вещества применялся портландцемент типа V согласно ASTM C150/C150M-19a с прочностью на сжатие в возрасте 28 сут 21 МПа.

Направленные в лабораторию образцы грунтоцемента имели степень влажности, близкую к полному водонасыщению. Средняя плотность  $\rho$  всех направленных образцов составляла 1,6 г/см<sup>3</sup> (табл. 1).

В настоящем исследовании испытания проводились в два этапа. На первом этапе основной упор был сделан на влияние вертикального напряжения на скорость распространения поперечных волн. На этом этапе отношение вертикального напряжения  $\sigma_1$  к боковому давлению  $\sigma_3$  достигает 7. Всего на этом этапе выполнено девять испытаний. Так как в проведенных исследованиях вертикальное напряжение  $\sigma_1$  прикладывается в направлении распространения волны, то следует ожидать, что его влияние на скорость поперечных волн будет уменьшаться при более высоких уровнях напряжений. Согласно исследованиям J.C. Santamarina и G. Cascante [8] влияние бокового давления будет иметь более выраженное влияние на скорость поперечной волны, поскольку напряжение в плоскости поляризации определяет скорость поперечной волны.

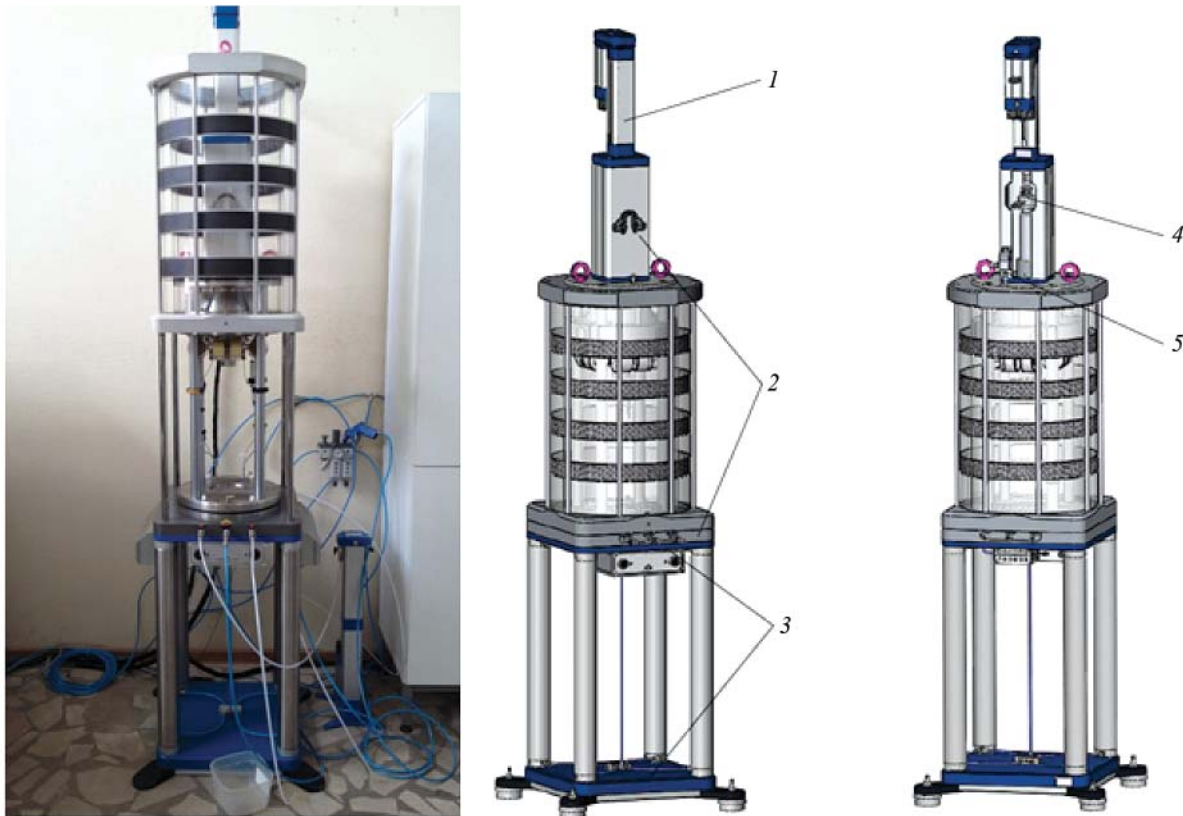
Испытания первого этапа проводились на трех пробах грунтоцемента. Нагрузочные сочетания приведены в табл. 2. Количество выполненных определений скорости сдвиговых волн  $V_s$  — 9.

На втором этапе лабораторных испытаний было выполнено определение скорости распространения поперечных волн при различных комбинациях бокового  $\sigma_3$  и вертикального  $\sigma_1$  напряжения. Результаты второго этапа предназначаются для оценки влияния анизотропного напряженного состояния и прогнозирования скоростей поперечных волн при уровнях напряжений, ожидаемых на площадке размещения проектируемых сооружений.

Табл. 1. Ведомость проб грунтоцементов

Table 1. Soil cement sample list

Порядковый номер пробы Sample number	Скважина Bored hole	Дата отбора Sampling date	Наименование грунта на этикетке Soil type on the label	Глубина от, м Depth from, m	Глубина до, м Depth to, m	Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>
1	BH_1	Апрель 2019 April 2019	Светло-серый хорошо перемешанный прочный Light gray, well-mixed, firm	2,4	2,6	1,61
2	BH_4			2,7	2,9	1,60
3	BH_2			4,0	4,2	1,58
4	BH_4			8,5	8,7	1,58
5	BH_3			8,8	9,0	1,53
6	BH_1			13,5	13,7	1,57
7	BH_4			14,7	14,9	1,60
8	BH_1			15,4	15,6	1,67
9	BH_2			15,5	15,7	1,60



**Рис. 4.** Резонансная колонка производства ООО «НПП «Геотек»», Россия. Условные обозначения:  
1 — силовой привод; 2 — камера; 3 — подъемное устройство; 4 — датчик силы; 5 — датчик давления

**Fig. 4.** Resonant column manufactured by NPP Geotek LLC, Russia. The legend: 1 — power drive; 2 — chamber;  
3 — lifting device; 4 — force sensor; 5 — pressure sensor



**Рис. 5.** Полностью водонасыщенный образец грунтоцемента на съемном нижнем пьедестале резонансной колонки

**Fig. 5.** Fully water-saturated soil cement sample on the removable bottom base of the resonant column

Испытания второго этапа проводились на нагрузочные сочетания, приведенные в табл. 3. Количество определений скорости сдвиговых волн  $V_s$  — 60.

В ходе анализа полученных экспериментальных данных выполнялся расчет относительных сдвиговых деформаций  $\gamma$  и резонансной частоты  $f$ . Для полученной резонансной частоты выполнялось определение скорости поперечных волн  $V_s$  в соответствии с выражением:

$$V_s = \omega h \left( \frac{J}{J_0} \right)^{-0.5}, \quad (5)$$

где  $J$  — момент инерции образца, зависит от его массы  $m$  и радиуса  $r$ ,

$$J = 0,5mr^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (6)$$

где  $J_0$  — момент инерции силового привода установки ( $J_0 = 0,007237 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ );  $h$  — высота образца, м;  $\omega = 2\pi f$  — круговая резонансная частота, рад/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате специальных лабораторных испытаний первого этапа были получены частные значения скоростей поперечных волн  $V_s$  (табл. 4).

Табл. 2. Сочетания нагрузок для проведения измерений скоростей волн (первый этап)

Table 2. Load combinations for wave velocity measurements (first stage)

Номер схемы нагружения Load No	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Отношение Ratio $\sigma_1/\sigma_3$
1	100	100	1
2	100	400	4
3	100	700	7

Табл. 3. Сочетания нагрузок для проведения измерений скоростей волн (второй этап)

Table 3. Load combinations for wave velocity measurements (second stage)

Номер схемы нагружения Load No	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Отношение Ratio $\sigma_1/\sigma_3$
1	40	150	3,75
2	40	375	9,39
3	40	600	15
4	75	75	1
5	75	335	4,67
6	75	600	8
7	150	165	1,1
8	150	550	3,67
9	280	400	1,43
10	280	600	2,14

Табл. 4. Результаты измерений скоростей волн (первый этап)

Table 4. Wave velocity measurement results (first stage)

No.	Глубина от, м Depth from, m	Глубина до, м Depth to, m	Номер схемы нагружения Loading pattern number	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с Shear wave velocity $V_s$ , m/s	Среднее значение скорости поперечных волн $V_{s, \text{ср.}}$ , м/с Average shear wave velocity $V_{s, \text{avg}}$ , m/s
1	2,4	2,6	1	100	100	518,55	512
2	8,5	8,7				556,50	
3	13,5	13,7				461,69	

Окончание табл. 4 / End of Table 4

No.	Глубина от, м Depth from, m	Глубина до, м Depth to, m	Номер схемы нагружения Loading pattern number	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с Shear wave velocity $V_s$ , m/s	Среднее значение скорости поперечных волн $V_s^{aver}$ , м/с Average shear wave velocity $V_s^{avg}$ , m/s
4	2,4	2,6	2	100	400	616,03	589
5	8,5	8,7				598,35	
6	13,5	13,7				552,14	
7	2,4	2,6	3	100	700	617,53	602
8	8,5	8,7				621,69	
9	13,5	13,7				567,43	

Графическая интерпретация результатов первого этапа представлена на рис. 6.

Полученная корреляционная зависимость между отношением вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$  и скоростью поперечных волн  $V_s$  характеризуется выражением вида:

$$V_s = A_1 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right) + B_1, \quad (7)$$

где  $A_1$  и  $B_1$  — постоянные значения, для первого этапа равны 48 и 515 соответственно.

Результаты испытаний второго этапа представлены в табл. 5.

При объединении выполненных испытаний в рамках второго этапа в единую серию получается корреляционная зависимость, представленная на иллюстрации (рис. 7).

Полученная корреляционная зависимость между отношением вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$  и скоростью поперечных волн  $V_s$  в рамках второго этапа характеризуется выражением вида:

$$V_s = A_2 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right) + B_2, \quad (8)$$

где  $A_2$  и  $B_2$  — постоянные значения, для второго этапа равны 24 и 502 соответственно.



Рис. 6. Результаты первого этапа испытаний. Боковое давление  $\sigma_3$  постоянно и составляет 100 кПа. Зависимость скорости распространения поперечных волн  $V_s$  от отношения вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$

Fig. 6. Stage 1 test results. Lateral pressure  $\sigma_3$  is constant and equals to 100 kPa. Dependence of the shear wave propagation velocity  $V_s$  on the ratio of vertical stress to lateral stress  $\sigma_1/\sigma_3$

Табл. 5. Результаты измерений скоростей волн (второй этап)

Table 5. Wave velocity measurement results (second stage)

No.	Глубина от, м Depth from, m	Глубина до, м Depth to, m	Номер схемы нагружения Loading pattern number	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с Shear wave velocity $V_s$ , m/s	Среднее значение скорости поперечных волн $V_s^{срел}$ , м/с Average shear wave velocity $V_s^{avg}$ , m/s
1	2,7	2,9	1	40	150	487,06	491
2	4	4,2				471,97	
3	8,8	9				386,50	
4	14,7	14,9				550,53	
5	15,4	15,6				517,65	
6	15,5	15,7				531,52	
7	2,7	2,9	2	40	375	487,06	530
8	4	4,2				540,12	
9	8,8	9				442,08	
10	14,7	14,9				586,38	
11	15,4	15,6				558,05	
12	15,5	15,7				563,61	
13	2,7	2,9	3	40	600	554,85	561
14	4	4,2				567,88	
15	8,8	9				498,96	
16	14,7	14,9				605,59	
17	15,4	15,6				570,00	
18	15,5	15,7				570,68	
19	2,7	2,9	4	75	75	482,04	426
20	4	4,2				413,92	
21	8,8	9				416,23	
22	14,7	14,9				522,37	
23	15,4	15,6				204,53	
24	15,5	15,7				516,11	
25	2,7	2,9	5	75	335	537,27	538
26	4	4,2				542,64	
27	8,8	9				480,86	
28	14,7	14,9				595,35	
29	15,4	15,6				499,97	
30	15,5	15,7				572,60	
31	2,7	2,9	6	75	600	558,62	565
32	4	4,2				566,62	
33	8,8	9				504,13	
34	14,7	14,9				609,43	
35	15,4	15,6				558,05	
36	15,5	15,7				594,43	

Окончание табл. 5 / End of Table 5

No.	Глубина от, м Depth from, m	Глубина до, м Depth to, m	Номер схемы нагружения Loading pattern number	Боковое напряжение $\sigma_3$ , кПа Lateral stress $\sigma_3$ , kPa	Вертикальное напряжение $\sigma_1$ , кПа Vertical stress $\sigma_1$ , kPa	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с Shear wave velocity $V_s$ , m/s	Среднее значение скорости поперечных волн $V_s^{ср}$ , м/с Average shear wave velocity $V_s^{avg}$ , m/s
37	2,7	2,9	7	150	165	514,68	517
38	4	4,2				507,31	
39	8,8	9				465,35	
40	14,7	14,9				569,74	
41	15,4	15,6				489,87	
42	15,5	15,7				552,06	
43	2,7	2,9	8	150	550	558,64	565
44	4	4,2				570,41	
45	8,8	9				506,72	
46	14,7	14,9				604,31	
47	15,4	15,6				558,05	
48	15,5	15,7				594,43	
49	2,7	2,9	9	280	400	544,81	552
50	4	4,2				559,05	
51	8,8	9				501,55	
52	14,7	14,9				592,79	
53	15,4	15,6				544,16	
54	15,5	15,7				572,60	
55	2,7	2,9	10	280	600	552,34	565
56	4	4,2				570,41	
57	8,8	9				514,47	
58	14,7	14,9				604,31	
59	15,4	15,6				565,63	
60	15,5	15,7				582,87	

Если результаты второго этапа рассортировать в зависимости от величины бокового давления  $\sigma_3$ , то получатся графические зависимости, представленные на рис. 8.

Корреляционные зависимости между отношением вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$  и скоростью поперечных волн  $V_s$ , сгруппированные в зависимости от величины бокового давления  $\sigma_3$ , характеризуются формулой (8), в которой постоянные значения равны:

- при  $\sigma_3 = 40$  кПа —  $A_2 = 50, B_2 = 424$ ;
- при  $\sigma_3 = 75$  кПа —  $A_2 = 69, B_2 = 428$ ;
- при  $\sigma_3 = 150$  кПа —  $A_2 = 41, B_2 = 513$ ;
- при  $\sigma_3 = 280$  кПа —  $A_2 = 31, B_2 = 442$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной задачей выполненных исследований является выявление зависимости между вертикальными напряжениями  $\sigma_1$  и скоростью поперечных волн  $V_s$  в режиме анизотропного трехосного сжатия в резонансной колонке. Задача обусловлена тем, что при возведении тяжелых сооружений энергетической промышленности существенно изменяется напряженное состояние основания, возникает анизотропное состояние. В большинстве случаев преобразование строительных свойств грунтов методом глубинного грунтосмещения применяется для улучшения работы основания при статических нагрузках [21–23]. В исследованиях Т.-С. Chang

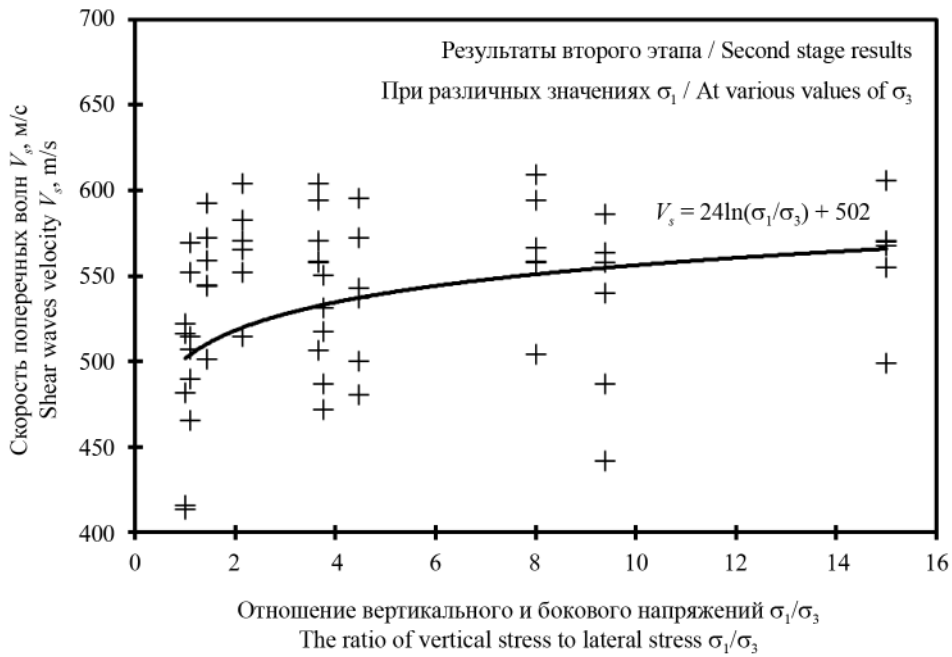


Рис. 7. Результаты второго этапа испытаний. Выполнены при различных значениях бокового давления  $\sigma_3$ , представлены в единой выборке. Зависимость скорости распространения поперечных волн  $V_s$  от отношения вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$

Fig. 7. Stage 2 test results. They are obtained at different values of lateral pressure  $\sigma_3$ , presented in a single sampling. Dependence of the shear wave propagation velocity  $V_s$  on the ratio of vertical stress to lateral stress  $\sigma_1/\sigma_3$



Рис. 8. Результаты второго этапа испытаний. Выполнены при различных значениях бокового давления  $\sigma_3$ , сгруппированы в зависимости от значения  $\sigma_3$ . Зависимость скорости распространения поперечных волн  $V_s$  от отношения вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$

Fig. 8. Stage 2 test results. They are obtained at different values of lateral pressure  $\sigma_3$ , grouped based on the  $\sigma_3$  value. Dependences of the shear wave propagation velocity  $V_s$  on the ratio of vertical stress to lateral stress  $\sigma_1/\sigma_3$

[24] и [25] отмечается, что статическая прочность грунтов после цементации увеличивается примерно в 15–20 раз. Помимо изменения физико-механических свойств, возникает и изменение динамических свойств грунтов [26]. В настоящем исследовании предложено экспериментальное обоснование зависимости изменения скорости поперечных волн  $V_s$  от анизотропного напряженного состояния для образцов грунтоцемента, отобранных из основания, преобразованного по технологии DSM.

Обобщая обзор аналогичных исследований и анализируя результаты выполненных лабораторных испытаний, сформулируем следующие основные выводы.

1. В настоящем исследовании не учитывалось влияние плотности и влажности направленных в лабораторию проб грунтоцемента. Поскольку пробы были доставлены в герметичной упаковке и не подвергались чрезмерным механическим перегрузкам, считаем их влажность и плотность близкими к естественным значениям. После вскрытия упаковки для всех образцов определялась плотность. Среднее (нормативное) значение — 1,6 г/см<sup>3</sup> (выполнена обработка измерений плотности по ГОСТ 20522–2012 «Методы статистической обработки результатов испытаний»). Относительная влажность направленных на испытания проб близка к полному водонасыщению (от 0,85 до 0,95 д.е.). Влияние влажности на изменение скорости распространения поперечных волн изучалось авторами ранее [26].

2. Испытания проводились методом малоамплитудных динамических испытаний в резонансной колонке в два этапа. На первом этапе выполнялись испытания, позволяющие установить наличие зависимости скорости поперечных волн от изменения соотношения между вертикальными и боковыми напряжениями в режиме трехосного сжатия. Анализ результатов (рис. 6) показал, что, чем выше вертикальное напряжение  $\sigma_1$ , тем больше скорость поперечных волн  $V_s$ . Так, в соответствии с выражением (7), при боковом давлении  $\sigma_3 = 100$  кПа увеличение вертикального напряжения  $\sigma_1$  в 7 раз приводит к росту скорости  $V_s$  на 15 % (по средним значениям от 515 до 608 м/с).

3. Данные, полученные на первом этапе исследований, показывают, что исходные предпосылки были верными, и имеет смысл продолжить испытания с учетом фактических соотношений между вертикальными  $\sigma_1$  и боковыми  $\sigma_3$  напряжениями в основании проектируемого сооружения энергетической промышленности. На втором этапе испытания образцов грунтоцемента выполнялись при напряженном состоянии, которое было получено по результатам математического моделирования работы реального основания методом конечных элементов в геотехническом программном комплексе PLAXIS. Анизотропное напряженное состояние в основании проектируемого комплекса возникает

как в процессе возведения, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений. При этом в расчетах учитывалось несколько точек по площади и по глубине основания проектируемого объекта энергетической промышленности.

4. Анализируя результаты испытаний второго этапа, следует отметить, что общая выборка из 60 определений скорости поперечных волн  $V_s$ , сформированная из результатов испытаний при различных значениях бокового давления  $\sigma_3$  (рис. 6, формула (7)), является нерепрезентативной за счет весьма низкого значения коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,1$ . Однако данная интерпретация результатов исследований может быть использована для качественного анализа. Отмечается увеличение скорости поперечных волн  $V_s$  совместно с увеличением соотношения  $\sigma_1/\sigma_3$  вертикального и бокового напряжений. Наблюдаем, что при величине соотношения  $\sigma_1/\sigma_3 = 1$  скорость поперечных волн  $V_s$  равна 502 м/с, а при величине соотношения  $\sigma_1/\sigma_3 = 15$   $V_s = 561$  м/с. Таким образом, происходит увеличение скорости поперечных волн  $V_s$  на 11 %. Данную оценку влияния анизотропного состояния можно использовать в первом приближении (для предварительных расчетов), до проведения непосредственных испытаний на конкретной строительной площадке, при возведении тяжелых сооружений на основаниях, преобразованных по технологии DSM.

5. Для более корректной оценки результатов испытаний второго этапа выполнено разделение экспериментальных графиков в зависимости от значений бокового давления  $\sigma_3$  (разноцветные линии соответствуют разным значениям бокового давления) (рис. 7). Подобная обработка позволяет увеличить значения коэффициентов достоверности аппроксимации  $R^2$  в несколько раз. Использование такого представления также позволяет оценить прирост скорости поперечных волн  $V_s$  в каждой конкретной точке основания проектируемого сооружения. Наиболее нагруженные точки показывают более сильный прирост, в то время как менее нагруженные участки демонстрируют умеренное возрастание скорости поперечных волн  $V_s$ .

6. Количественная оценка результатов выполненных исследований второго этапа на основании выражения (8) позволяет получить следующие результаты:

- красный маркер — боковое давление  $\sigma_3 = 40$  кПа — увеличение скорости поперечных волн  $V_s$  от 424 до 559 м/с (прирост на 24 %);
- зеленый маркер —  $\sigma_3 = 75$  кПа — увеличение  $V_s$  от 428 до 572 м/с (прирост на 25 %);
- синий маркер —  $\sigma_3 = 150$  кПа — увеличение  $V_s$  от 513 до 570 м/с (прирост на 10 %);
- фиолетовый маркер —  $\sigma_3 = 280$  кПа — увеличение  $V_s$  от 542 до 566 м/с (прирост на 4 %).

7. Наблюдается явная тенденция: чем меньше было исходное боковое давление  $\sigma_3$ , тем больше прирост скорости поперечных волн  $V_s$  в процессе анизотропного трехосного сжатия в резонансной колонке. При этом даже без увеличения вертикального напряжения  $\sigma_1$  при увеличении бокового давления  $\sigma_3$  растет и скорость поперечных волн  $V_s$ . Так, при боковом давлении  $\sigma_3 = 40$  кПа  $V_s = 424$  м/с, а при  $\sigma_3 = 280$  кПа скорость  $V_s = 542$  м/с.

8. Представленные выше выводы в целом согласуются с аналогичными исследованиями J.C. Santamarina [8] и T.-S. Chang [24]. Если использовать выражения (1) и (2) для анализа исследований второго этапа, то получим следующее. Воспользуемся многопараметрическим регрессионным анализом для оценки результатов исследований.

Предположим, что на скорость распространения поперечных волн при анизотропном напряженном состоянии влияет только главное напряжение согласно формуле (1) (назовем это моделью № 1). Результат получится в виде следующей зависимости:

$$V_s = 248 \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^{0,14}, \quad (9)$$

Достоверность аппроксимации в случае использования этого выражения составляет  $R^2 = 0,88$ .

Если воспользоваться гипотезой, выраженной формулой (2) (пусть это будет модель № 2), то результаты исследований выражаются следующей формулой:

$$V_s = 318 \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^{0,09} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^{0,01}. \quad (10)$$

Для модели № 2 достоверность аппроксимации существенно выше и составляет  $R^2 = 0,97$ .

9. Полученные значения постоянных коэффициентов  $\alpha = 0,09$  и  $\beta = 0,01$  для образцов грунтоцемента при анизотропном напряженном состоянии существенно отличаются от значений, рекомендованных в работе [8] (для зернистых материалов  $\beta \geq 0,25$ ). Столь низкое значение постоянного коэффициента  $\beta = 0,01$  можно трактовать и как незначительное влияние анизотропного напряженного состояния на изменение скорости поперечных волн  $V_s$ . Иными словами, влияние бокового давления  $\sigma_3$  более значительно, чем вертикальное напряжение  $\sigma_1$ .

Отметим также, что в исследовании [8] отношение вертикального напряжения к боковому  $\sigma_1/\sigma_3$  не превышало 3, в то время как в настоящем исследовании оно достигает 15.

В качестве цели для дальнейших исследований отметим необходимость оценки влияния преобразования основания методом глубинного грунтосмещения для защиты от динамического разжижения грунтов. Ряд исследований, в частности [27–30], показывает, что существует зависимость между величиной скорости распространения поперечных волн  $V_s$  и возможностью динамического разжижения грунтов. Так, если в дальнейшем сопоставить результаты исследований скоростей неукрепленного и укрепленного грунтов (до DSM и после), и с учетом роста скорости при увеличении вертикального напряжения от проектируемого сооружения, то можно дать оценку динамической неустойчивости до преобразования строительных свойств грунтов основания и после возведения сооружения в условиях динамических воздействий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романов Н.В., Расинэ Ж. Обзор современных методов усиления и стабилизации слабых оснований // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4. С. 499–513. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.499-513
2. Egorova A.A., Rybak J., Stefaniuk D., Zajackowski P. Basic aspects of deep soil mixing technology control // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. Vol. 245. No. 2. P. 022019. DOI: 10.1088/1757-899X/245/2/022019
3. Jung C., Ceglarek R., Clauvelin T., Ayeldeen M., Kim D. Deep soil mixing in Sabkha soils for foundation support in United Arab Emirates // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2020. Vol. 6. DOI: 10.1007/s40891-020-0188-4
4. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5. С. 537–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.537-544
5. Fernandez A.L., Santamarina J.C. Effect of cementation on the small-strain parameters of sands // Canadian Geotechnical Journal. 2001. Vol. 38. No. 1. Pp. 191–199. DOI: 10.1139/t00-081
6. Park J., Santamarina J.C. Sand response to a large number of loading cycles under zero-lateral-strain conditions: evolution of void ratio and small-strain stiffness // Géotechnique. 2019. Vol. 69. No. 6. Pp. 501–513. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.124
7. Clayton C.R.I. Stiffness at small strain: research and practice // Geotechnique. 2011. Vol. 61. No. 1. Pp. 5–37. DOI: 10.1680/geot.2011.61.1.5
8. Santamarina J.C., Cascante G. Stress anisotropy and wave propagation: A micromechanical view // Canadian Geotechnical Journal. 1996. Vol. 33. No. 5. Pp. 770–782. DOI: 10.1139/t96-102-323
9. Shin H., Santamarina J.C. Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures // Journal of Geotechnical and Geoenvironmen-

- tal Engineering. 2013. Vol. 139. No. 2. Pp. 353–355. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000768
10. Chiara N., Stokoe II K.H. Sample disturbance in resonant column test measurement of small-strain shear wave velocity // *Solid Mechanics and its Applications*. 2007. Vol. 146. Pp. 605–613. DOI: 10.1007/978-1-4020-6146-2\_41
11. Kottke A.R., Keene A., Wang Y., Shin B., Stokoe II K.H., Lewis M.R. In situ and laboratory measured dynamic properties of a marine clay // *Geotechnical Frontiers*. 2017. DOI: 10.1061/9780784480472.036
12. Rashid A.S.A., Black J.A., Kueh A.B.H., Noord N.M. Behaviour of weak soils reinforced with soil cement columns formed by the deep mixing method: Rigid and flexible footings // *Measurement*. 2015. Vol. 68. Pp. 262–279. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.039
13. Viggiani G., Atkinson J.H. Stiffness of fine-grained soil at very small strains // *Geotechnique*. 1995. Vol. 45. No. 45. Pp. 249–265. DOI: 10.1680/geot.1995.45.2.249
14. Bahador M., Pak A. Small-strain shear modulus of cement-admixed kaolinite // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2012. Vol. 30. Pp. 163–171. DOI: 10.1007/s10706-011-9458-1
15. Sharma R., Baxter C., Jander M. Relationship between shear wave velocity and stresses at failure for weakly cemented sands during drained triaxial compression // *Soils and Foundations*. 2011. Vol. 51. No. 4. Pp. 761–771. DOI: 10.3208/sandf.51.761.
16. Chong S.-H., Kim J.W., Cho G.-C., Song K.-I. Preliminary numerical study on long-wavelength wave propagation in a jointed rock mass // *Geomechanics and Engineering*. 2020. Vol. 21. No. 3. Pp. 227–236. URL: <http://www.techno-press.org/content/?page=article&journal=gae&volume=21&num=3&ordernum=1>
17. Cha M., Cho G.C. Shear strength estimation of sandy soils using shear wave velocity // *Geotechnical Testing Journal*. 2007. Vol. 30. No. 6. Pp. 484–495. DOI: 10.1520/GTJ100011
18. Абрамова Т.Т. Защита грунтовых массивов от динамических и сейсмических воздействий // *Символ науки*. 2016. № 4–4. С. 41–49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25948847>
19. Абрамова Т.Т., Валиева К.Э. Обзор современных технологий по снижению воздействия динамических нагрузок на грунты // *Комплексные проблемы техноферной безопасности* : мат. междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 26–28 октября 2017 г.). Воронеж, 2017. С. 33–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35034052>
20. Абрамова Т.Т., Вознесенский Е.А. Современные методы управления свойствами грунтов на участках высоких динамических нагрузок // *Гетехника*. 2015. № 4. С. 6–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24112910>
21. Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А., Корнач А.И. Преобразование грунтовых оснований с применением технологии глубинного перемешивания грунта // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*, 2017. Т. 8. № 4. С. 116–125. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.12
22. Корнач А.И. Особенности расчета оснований, усиленных по технологии глубинного перемешивания грунта DSM // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении* : мат. междунар. науч.-практ. конф. Новочеркасск, 13–15 мая 2015. Новочеркасск, 2015. С. 450–455.
23. Zotsenko M., Vynnykov Yu., Kharchenko M. Experience of weak soil reinforcement by soil-cement elements manufactured by deep soil mixing technology // *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7. No. 3.2. Pp. 486–493. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14577
24. Chang T.-S., Vedula V.R., Chang K.-P. Improvement of static and dynamic properties of soft clay using high pressure jet grout // *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Vol. 23. URL: <https://scholar.mine.mst.edu/icrageesd/04icrageesd/session01/23>
25. Ильин С.В., Жевжиков И.И. Технологии усиления слабых грунтов оснований, применяемые на объектах Государственной компании «Автодор» // *Дорожники*. 2017. № 2 (10). С. 6–11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37001402>
26. Соболев Е.С., Тер-Мартirosян А.З., Морев Д.С. Экспериментальные исследования скоростей упругих поперечных волн в грунтоцементе в зависимости от плотности, влажности и напряженного состояния // *Геотехника*. 2019. Т. 11. № 3. С. 6–21. DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-3-6-21
27. Kiyota T., Wu C. Evaluation of liquefaction resistance from in situ and laboratory-measured shear wave velocities // *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*. 2018. Pp. 237–243. DOI: 10.1061/9780784481455.023
28. Chang W.-J. Evaluation of liquefaction resistance for gravelly sands using gravel content-corrected shear-wave velocity // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016. Vol. 142. No. 5. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001427
29. Erteleva O.O., Sidorin A.Ya., Sokolova E.Yu., Lukk A.A., Nikonov A.A., Aptikaev F.F., Shvarev S.V. Methods for assessing the seismic hazard of stable continental areas using combined paleoseismological and geophysical Data // *Seismic Instruments*. 2019. Vol. 55. Pp. 464–485. DOI: 10.3103/s0747923919040078
30. Чернов Ю.К. Предварительный анализ возможности сейсмогенного разжижения грунтов (на примере водонасыщенных песчано-глинистых отложений в п. Кудепста Адлеровского района г. Сочи) // *Геология и геофизика Юга России*. 2019. Т. 9. № 1. С. 58–70. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26788. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37218368>

Поступила в редакцию 20 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 17 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2020 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Армен Заветович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, руководитель Научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

**Евгений Станиславович Соболев** — кандидат технических наук, доцент кафедры механики грунтов и геотехники, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Геотехника», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 689839, ResearcherID: U-2527-2018; e.s.sobolev@mail.ru.

## REFERENCES

1. Romanov N.V., Racinais J. Review of modern technologies of reinforcement and stabilization of soft soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2018; 13(4):499-513. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.499-513 (rus.).
2. Egorova A.A., Rybak J., Stefaniuk D., Zajackowski P. Basic aspects of deep soil mixing technology control. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 245(2):022019. DOI: 10.1088/1757-899X/245/2/022019
3. Jung C., Ceglarek R., Clauvelin T., Ayedeen M., Kim D. Deep soil mixing in Sabkha soils for foundation support in United Arab Emirates. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2020; 6. DOI: 10.1007/s40891-020-0188-4
4. Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. Operating safety of foundations of buildings and structures under dynamic impact. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2017; 12(5):537-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.537-544 (rus.).
5. Fernandez A.L., Santamarina J.C. Effect of cementation on the small-strain parameters of sands. *Canadian Geotechnical Journal*. 2001; 38(1):191-199. DOI: 10.1139/t00-081
6. Park J., Santamarina J.C. Sand response to a large number of loading cycles under zero-lateral-strain conditions: evolution of void ratio and small-strain stiffness. *Geotechnique*. 2019; 69(6):501-513. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.124
7. Clayton C.R.I. Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*. 2011; 61(1):5-37. DOI: 10.1680/geot.2011.61.1.5
8. Santamarina J.C., Cascante G. Stress anisotropy and wave propagation: A micromechanical view. *Canadian Geotechnical Journal*. 1996; 33(5):770-782. DOI: 10.1139/t96-102-323
9. Shin H., Santamarina J.C. Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013; 139(2):353-355. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000768
10. Chiara N., Stokoe II K.H. Sample disturbance in resonant column test measurement of small-strain shear wave velocity. Ling H.I., Callisto L., Leshchinsky D., Koseki J. (eds.). *Solid Mechanics and its Applications*. 2007. 146:605-613. DOI: 10.1007/978-1-4020-6146-2\_41
11. Kottke A.R., Keene A., Wang Y., Shin B., Stokoe II K.H., Lewis M.R. In situ and laboratory measured dynamic properties of a marine clay. *Geotechnical Frontiers*. 2017. DOI: 10.1061/9780784480472.036
12. Rashid A.S.A., Black J.A., Kueh A.B.H., Noord N.M. Behaviour of weak soils reinforced with soil cement columns formed by the deep mixing method: Rigid and flexible footings. *Measurement*. 2015; 68:262-279. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.039
13. Viggiani G., Atkinson J.H. Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Geotechnique*. 1995; 15(2):249-265. DOI: 10.1680/geot.1995.45.2.249
14. Bahador M., Pak A. Small-strain shear modulus of cement-admixed kaolinite. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2012; 30:163-171. DOI: 10.1007/s10706-011-9458-1
15. Sharma R., Baxter C., Jander M. Relationship between shear wave velocity and stresses at failure for weakly cemented sands during drained triaxial compression. *Soils and Foundations*. 2011; 51(4):761-771. DOI: 10.3208/sandf.51.761
16. Chong S.H., Kim J.W., Cho G.C., Song K.I. Preliminary numerical study on long-wavelength wave propagation in a jointed rock mass. *Geomechanics and Engineering*. 2020; 21(3):227-236. URL: <http://www.techno-press.org/content/?page=article&journal=gae&volume=21&num=3&ordernum=1>
17. Cha M., Cho G.C. Shear strength estimation of sandy soils using shear wave velocity. *Geotechnical Testing Journal*. 2007; 30(6):484-495. DOI: 10.1520/GTJ100011

18. Abramova T.T. Protection of soil masses from dynamic and seismic loads. *Symbol of Science*. 2016;(4-4):41-49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25948847> (rus.).
19. Abramova T.T., Valieva K.E. The overview of modern technologies to reduce the impact of dynamic loads on soils. *Complex issues of technogenic safety : materials of international research and practice conference (Voronezh, 26–27 October 2017)*. Voronezh, 2017; 33-37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35034052> (rus.).
20. Abramova T.T., Voznesensky E.A. Modern methods of soil properties management at the sites of high dynamic loads. *Geotechnics*. 2015; (4):6-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24112910> (rus.).
21. Zekhniev F.F., Vnukov D.A., Korpach A.I. Soil bases improvement by using deep soil mixing technology. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017; 8(4):116-125. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.12 (rus.).
22. Korpach A.I. Specific features of computation of foundations reinforced by means of DSM-method. *Mechanics of soils in geotechnics and foundation engineering : materials of international research and practice conference. Novocherkassk, 13–15 May 2015*. Novocherkassk, 2015; 134-137. (rus.).
23. Zotsenko M., Vynnykov Yu., Kharchenko M. Experience of weak soil reinforcement by soil-cement elements manufactured by deep soil mixing technology. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(3):486-493. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14577
24. Chang T.-S., Vedula V.R., Chang K.-P. Improvement of static and dynamic properties of soft clay using high pressure jet grout. *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 23. URL: <https://scholarmine.mst.edu/icrageesd/04icrageesd/session01/23>
25. Ilyin S.V., Zhevzhikov I.I. Technologies for strengthening soft soils of foundations used at the facilities of the State company Avtodor. *Road workers*. 2017; (10):6-11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37001402> (rus.).
26. Sobolev E.S., Ter-Martirosyan A.Z., Mor-ev D.S. Experimental studies of elastic shear wave speeds in soil-cement depending on density, moisture content and stress state. *Geotechnics*. 2019; 11(3):6-21. DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-3-6-21 (rus.).
27. Kiyota T., Wu C. Evaluation of liquefaction resistance from in situ and laboratory-measured shear wave velocities. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*. 2018; 237-243. DOI: 10.1061/9780784481455.023
28. Chang W.J. Evaluation of liquefaction resistance for gravelly sands using gravel content-corrected shear-wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016. 142(5). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001427
29. Erteleva O.O., Sidorin A.Ya., Sokolova E.Yu., Lukk A.A., Nikonov A.A., Aptikaev F.F., Shvarev S.V. Methods for assessing the seismic hazard of stable continental areas using combined paleoseismological and geophysical data. *Seismic Instruments*. 2019; 55:464-485. DOI: 10.3103/s0747923919040078
30. Chernov Yu.K. A Preliminary analysis of the ability of seismic liquefaction of soils (for example, water-saturated sandy-clay deposits in Kudepsta village, Adler district of Sochi). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. 9(1):58-70. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26788. (rus.).

Received April 20, 2020.

Adopted in a revised form on June 17, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

**BIONOTES:** **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Head of Research and Education Center “Geotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; [gic-mgsu@mail.ru](mailto:gic-mgsu@mail.ru);

**Evgeniy S. Sobolev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Researcher of Research and Education Center “Geotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 689839, ResearcherID: U-2527-2018; [e.s.sobolev@mail.ru](mailto:e.s.sobolev@mail.ru).

## Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии

М.Г. Плюснин, С.В. Цыбакин

*Костромская государственная сельскохозяйственная академия (КГСХА);  
пос. Каравеево, Костромская область, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проведены экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона и оценка ее влияния на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов. Основным методом расчета железобетонных конструкций по прочности по нормальным сечениям в соответствии с действующими нормативными документами является нелинейная деформационная модель. Представляет интерес и использование этого метода в вероятностных расчетах. Аналитические функции, аппроксимирующие фактическую диаграмму  $\sigma$ – $\epsilon$  бетона, используют в качестве параметров значения прочностных и деформационных характеристик бетона. При этом изменчивость деформационных характеристик бетона исследована пока недостаточно, хотя их значения могут оказывать существенное влияние на результаты расчета.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной цели получены полные диаграммы  $\sigma$ – $\epsilon$  бетона при одноосном сжатии. С использованием этих диаграмм численно проведена оценка влияния изменчивости деформационных характеристик бетона на несущую способность внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению. Несущая способность определялась с помощью нелинейной деформационной модели.

**Результаты.** Эксперимент показал, что в пределах одного класса по прочности форма диаграммы имеет существенную изменчивость. В результате расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента с использованием экспериментальных диаграмм  $\sigma$ – $\epsilon$  бетона при одноосном сжатии показано влияние величины предельных деформаций бетона  $\epsilon_{p0}$  на несущую способность по нормальному сечению.

**Выводы.** Анализ полученных результатов показал, что значение предельных деформаций бетона при одноосном сжатии влияет на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов. Степень влияния зависит от прочности бетона, процента армирования и эксцентриситета продольной силы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** нелинейная деформационная модель, деформационные характеристики бетона, надежность железобетонных конструкций, внецентренно сжатый железобетонный элемент, коэффициент вариации, изменчивость характеристик

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Плюснин М.Г., Цыбакин С.В. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1390–1398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398

## An experimental study on variability of deformation characteristics of concrete in compression

Mixail G. Plyusnin, Sergey V. Tsybakin

*Kostroma State Agricultural Academy (KSAA); village Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** An experimental study on variability of deformation characteristics of concrete and an assessment of its influence on the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements were performed. In pursuance of effective regulatory documents, a non-linear deformation model was applied to perform the strength analysis of standard cross sections of reinforced concrete structures. The application of this method in probabilistic design is also of interest. Analytical functions approximating the true  $\sigma$ – $\epsilon$  diagram, made for concrete, use strength and deformation characteristics of concrete as parameters. However, variability of deformation characteristics of concrete has not been sufficiently studied, although it may have significant influence on results of analyses.

**Materials and methods.** Complete  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrams were made for uniaxially compressed concrete to solve this problem. These diagrams were applied to numerically assess the influence of variability of deformation characteristics of concrete on the bearing capacity of an eccentrically compressed reinforced concrete element in terms of its standard cross section. A non-linear deformation model was used to identify the bearing capacity.

**Results.** The experiment has proven substantial variation of diagram shapes within the same strength class. The influence of the  $\epsilon_{p0}$  value of ultimate deformations of concrete on the bearing capacity is demonstrated for a standard cross section as a result of the strength analysis of an eccentrically compressed reinforced concrete element. The strength analysis was performed by applying experimental  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrams made for uniaxially compressed concrete.

**Conclusions.** The analysis of the findings has shown that the value of ultimate deformations of concrete exposed to uniaxial compression affects the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. The degree of influence depends on concrete strength, reinforcement percentage and the eccentricity of a longitudinal force.

**KEYWORDS:** non-linear deformation model, deformation characteristics of concrete, reliability of reinforced concrete structures, eccentrically compressed reinforced concrete element, coefficient of variation, variability of characteristics

**FOR CITATION:** Plyusnin M.G., Tsybakin S.V. An experimental study on variability of deformation characteristics of concrete in compression. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1390-1398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники при расчете прочности строительных конструкций расширяется применение вероятностных подходов, предложенных и развитых в работах Н.С. Стрелецкого, А.Р. Ржаницына, В.В. Болотина, В.Д. Райзера и других ученых [1–5]. Расчеты конструкций в вероятностной постановке базируются на детерминированных методах, но в отличие от них, более полно учитывают случайный характер исходных данных. В работах [6–13] приведены реализации вероятностного подхода при расчете железобетонных конструкций, учитывающие статистическую изменчивость исходных данных.

Как отечественные, так и зарубежные нормы по расчету железобетонных конструкций рекомендуют при расчетах прочности железобетонных конструкций по нормальным сечениям использовать нелинейную деформационную модель. При реализации этого метода используются расчетные диаграммы  $\sigma$ – $\varepsilon$  материалов, которые сформированы на базе экспериментальных данных, что позволяет учесть влияние не только прочностных, но и деформационных характеристик материалов и повысить достоверность расчетов. В связи с этим представляется логичным применять нелинейную деформационную модель и при вероятностных расчетах железобетонных конструкций. Однако на текущий момент изменчивость формы диаграммы  $\sigma$ – $\varepsilon$  исследована недостаточно. Со значительной точностью форма диаграммы  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона при сжатии или растяжении определяется значениями максимальных напряжений (прочности), деформаций, соответствующих этим напряжениям, и начального модуля упругости. Если сведения по изменчивости прочности бетона имеются в нормативной и научной литературе и на их основе определены расчетные значения прочности, то имеющихся экспериментальных данных по деформационным характеристикам бетона [14–21] пока недостаточно для понимания характера их статистического распределения. Очевидно, что деформационные характеристики бетона зависят от множества факторов, таких как состав смеси, свойства заполнителей, вид применяемых добавок и технологии изготовления. Следовательно, бетоны с одинаковой прочностью могут иметь различные деформационные характеристики, что показано в статье [21]. В работе [20] приводятся результаты проведенного в НИУ МГСУ экспериментального исследования полных диаграмм деформирования

армированных и неармированных бетонных образцов, полученных с помощью стандартного испытательного пресса, оснащенного устройством, воспринимающим часть нагрузки, прикладываемой к образцу, чем обеспечивается плавное разрушение образца и возможность получения нисходящей ветви диаграммы. При испытании пяти неармированных бетонных призм авторами данной работы получены значения прочности в диапазоне 14,5–17,44 МПа со средним значением 16,04 МПа и коэффициентом вариации, равным 7,5. Значения предельных деформаций для этих образцов находились в диапазоне 1,5–2,2 % со средним значением 1,82 % и коэффициентом вариации 15,6 %. Значение коэффициента линейной корреляции между прочностью и предельными деформациями составило 0,57. Таким образом, при близких значениях прочности, позволяющих отнести данные образцы к одному классу бетона по прочности на сжатие, наблюдался существенный разброс значений предельных деформаций.

Класс бетона по прочности на сжатие, назначенный при проектировании железобетонных конструкций, может быть реализован с применением различных рецептур и ингредиентов, что совместно со случайными воздействиями в процессе строительного производства и приводит к существенному колебанию деформационных характеристик бетона. На необходимость учета изменчивости деформационных характеристик бетона при расчете железобетонных конструкций указывается в работе [14]. В трудах [22–24] показано, что значения деформационных характеристик материалов могут оказывать существенное влияние на результаты расчетов по прочности, в том числе, на обеспеченность прочности изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов. В соответствии с действующими нормами, при расчетах на прочность совместно с расчетными значениями прочности, имеющими обеспеченность, близкую к 100 %, используются средние (с обеспеченностью 50 %) значения деформационных характеристик бетона. Это вносит неопределенность в оценку обеспеченности результатов расчетов железобетонных конструкций.

При расчетах на прочность влияние растянутого бетона, как правило, не учитывается, так как его вклад в несущую способность не существен. В связи с этим экспериментальные исследования полных диаграмм  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона при сжатии с целью оценки изменчивости деформационных характеристик бетона являются актуальными. Исходя из вышесказанного, цель настоящей работы — получение

полных диаграмм  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона при одноосном сжатии для предварительной оценки влияния изменчивости деформационных характеристик (пределных деформаций бетона  $\varepsilon_{b0}$  и модуля упругости  $E_b$ ) в пределах одного класса бетона по прочности на сжатие на несущую способность внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения цели исследования было изготовлено семь бетонных образцов — призм размером  $100 \times 100 \times 400$  мм. Состав бетона проектировался для класса прочности на сжатие В20. Для уменьшения вероятности внецентренного сжатия из-за неравномерного распределения крупного заполнителя по объему образца использовался щебень фракции 5–10 мм. Требуемая средняя прочность бетона определялась исходя из расчетного сопротивления бетона соответствующего класса по СП 63.13330.2018 и нормативного значения коэффициента вариации прочности бетона на сжатие, равного 13,5 %, по формуле (1):

$$R_{cp} = R_b / (1 - 3v). \quad (1)$$

Для приближения коэффициента вариации прочности бетона к принятому в нормах значению 13,5 % образцы изготавливались за четыре замеса с интервалом не менее суток — первые три замеса по две призмы, в четвертый — одна призма. При этом специально не проводился инструментальный контроль влажности инертных заполнителей и времени вибрирования образцов. После изготовления образцы находились 28 суток в нормальных условиях, а затем хранились два месяца в закрытом помещении для уменьшения разницы в прочности, вызванной различием по времени между замесами. Все призмы были проверены на параллельность граней.

Испытания проводились на испытательной машине ИП-1000-М-авто, оборудованной системой управления/измерения ASTM-Digital «Профессиональная». Данное оборудование позволяет устанавливать произвольные режимы нагружения с обратной связью как по усилию, так и по перемещению плиты пресса. Способ загрузки принят исходя из методики, описанной в трудах [15, 25]. Так как для решения задач исследования не требовалось достижение значительных деформаций образцов на нисходящей ветви, то дополнительные устройства, ограничивающие их загрузку, не использовались. Для более точного определения максимума диаграммы образцы нагружались при постоянной скорости перемещения плиты пресса, равной 0,005 мм/с. Деформации бетона определялись осевым экстензометром EPSILON 3542RA с базой 250 мм, который включает в себя два обычных экстензометра и позволяет контролировать деформации

на двух противоположных гранях образца. Дополнительно по датчику перемещения плиты пресса контролировалась общая деформация призмы. При установке на плиту пресса образцы центрировались по специальному шаблону. Соответствие физической и геометрической осей образцов в дополнение к показаниям приборов оценивалось по характеру разрушения призм. Вид экспериментальной установки показан на рис. 1. За счет высокой жесткости испытательной машины и высокой точности поддержания скорости перемещения ее плиты удалось избежать «взрывного» характера разрушения, характерного для призм. Это позволило не снимать с образца экстензометр до полного окончания его испытания, которое у всех призм завершалось при появлении видимых невооруженным взглядом вертикальных трещин в средней части образца. Значения напряжений вычислялись как частное от деления усилия, создаваемого прессом, на площадь сечения призмы. Значения предельных относительных деформаций бетона  $\varepsilon_{b0}$  находились как деформации, соответствующие максимуму напряжений. Модуль упругости вычислялся на основании методики, приведенной в ГОСТ 24452-80, как частное от деления напряжений, составляющих 30 % от их максимального значения, на величину соответствующих относительных деформаций.



Рис. 1. Вид экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental unit

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате испытаний диаграммы показаны на рис. 2. Значения максимальных напряжений, предельных деформаций и модуля упругости для испытанных образцов приведены в табл. 1. Так же в табл. 1, 2 приведены средние значения вышеуказанных величин и их коэффициенты вариации. Для сравнения в табл. 1 показаны средние значения прочности, рассчитанные по формуле (1), а также значения начального модуля упругости и предельных деформаций по действующим нормам.

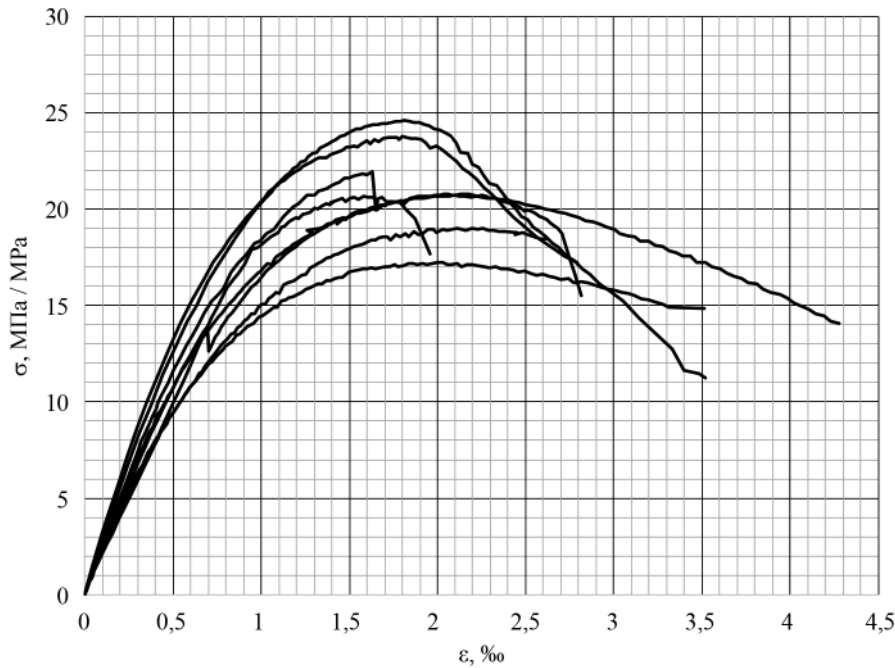


Рис. 2. Диаграммы  $\sigma$ – $\varepsilon$  при осевом сжатии

Fig. 2.  $\sigma$ – $\varepsilon$  diagrams describing exposure to axial compression

Все полученные диаграммы в целом схожи и включают в себя характерные участки преобладания упругих деформаций (примерно до  $0,5 \sigma_{\max}$ ), преобладания пластических деформаций ( $0,5 \sigma_{\max} \dots \sigma_{\max}$ ) и ниспадающую ветвь. Средние значения начального модуля упругости и предельных деформаций, полученные в эксперименте, несколько меньше значений, указанных в нормах. Заметно, что при близких значениях прочности образцов, форма

соответствующих диаграмм  $\sigma$ – $\varepsilon$  различается. В целом, полученные результаты близки с приведенными в работе [20], однако разброс значений предельных деформаций в настоящем исследовании оказался несколько меньше, чем в исследовании [20]. Это может быть связано с различием характера нагружения образцов — ступенчатого в труде [20] и плавного в описываемом эксперименте.

Табл. 1. Значения прочностных и деформационных характеристик испытанных образцов

Table 1. Values of strength and deformation characteristics of tested samples

№ п/п Item No.	Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа Maximum tensions $\sigma_{\max}$ , МПа	Предельные деформации $\varepsilon_{b0}$ , ‰ Ultimate deformations $\varepsilon_{b0}$ , ‰	Начальный модуль упругости $E_b$ , ГПа Initial elasticity modulus $E_b$ , GPa
1	17,2	1,997	18,191
2	20,7	2,095	23,011
3	20,8	2,033	22,945
4	20,7	2,098	20,475
5	21,9	1,627	24,859
6	20,7	1,578	19,781
7	23,7	1,796	29,758
Среднее значение / Mean value	<b>20,8</b>	<b>1,890</b>	<b>22,720</b>
Среднее значение по СП Average value pursuant to Rules and Regulations	<b>19,33</b>	<b>2,000</b>	<b>27,5</b>
Коэффициент вариации / Variation coefficient	<b>9,39 %</b>	<b>11,69 %</b>	<b>16,9 %</b>

Полученные в результате эксперимента значения коэффициентов вариации предельных деформаций бетона при сжатии и начального модуля упругости бетона превышают значение коэффициента вариации прочности бетона. Минимальное значение предельных деформаций бетона, полученное в результате проведенных испытаний, составило 1,578 ‰, что существенно меньше указанного в действующих нормах значения, равного 2 ‰. Как показано в исследованиях [14–16], значения предельных деформаций бетона влияют на прочность железобетонных конструкций. Особенно заметно это влияние проявляется во внецентренно сжатых железобетонных элементах, где на значение расчетного сопротивления сжатой арматуры оказывают влияние предельные деформации бетона при сжатии. При значении коэффициента вариации предельных деформаций бетона, полученном в описываемом эксперименте и равном 11,69 ‰, расчетное значение  $\epsilon_{b0}$  (с обеспеченностью, соответствующей обеспеченности расчетного сопротивления бетона), определенное в предположении его нормального распределения по формуле (2), будет равно 1,299 ‰. Тогда значение расчетного сопротивления арматуры при сжатии для кратковременных нагрузок, которое определяется умножением модуля упругости арматуры и предельных деформаций бетона при сжатии, будет равно всего 259,8 МПа, что существенно меньше значения данной величины, указанного в действующих нормах (400 МПа).

$$\epsilon_{b0, \text{расч}} = \epsilon_{b0, \text{средн}} (1 - 3v). \quad (2)$$

При реализации вероятностных методов расчета железобетонных конструкций, при формировании распределений исходных данных необходимо иметь сведения об их взаимной корреляции. Для оценки взаимозависимости прочности, предельных деформаций и начального модуля упругости были определены коэффициенты линейной корреляции, значения которых представлены в табл. 2.

**Табл. 2.** Значения коэффициентов линейной корреляции между прочностными и деформационными характеристиками бетона

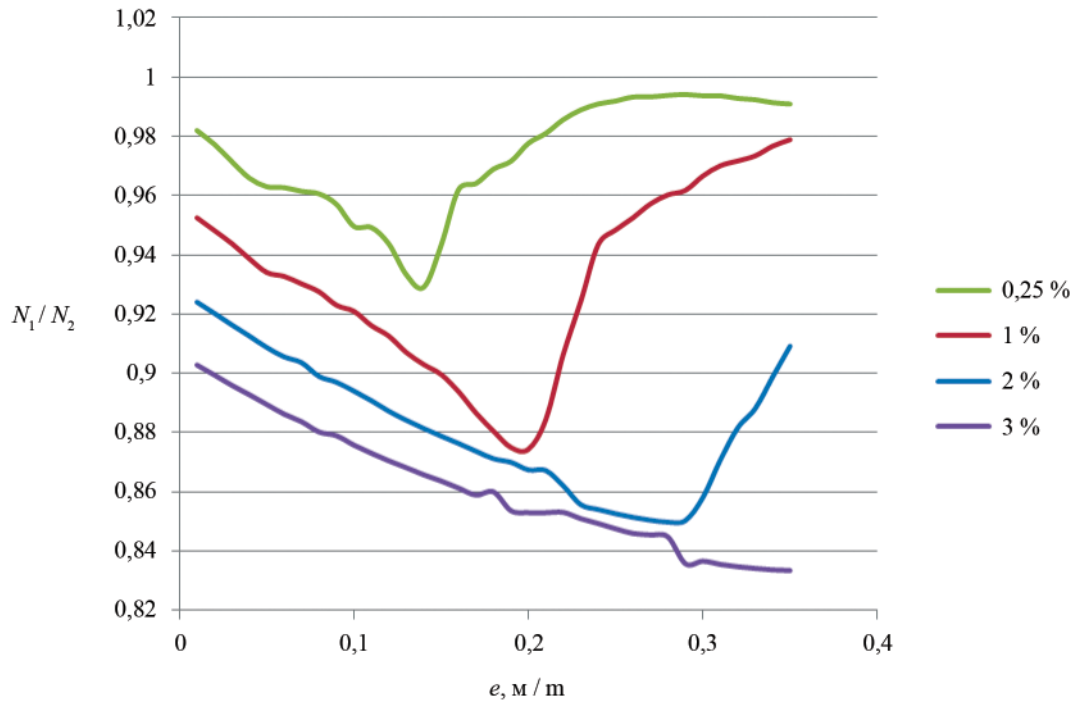
**Table 2.** Coefficients of linear correlation between strength values and deformation characteristics of concrete

Корреляция $E_b - \epsilon_{b0}$ $E_b - \epsilon_{b0}$ correlation	Корреляция $\sigma_{\max} - E_b$ $\sigma_{\max} - E_b$ correlation	Корреляция $\sigma_{\max} - \epsilon_{b0}$ $\sigma_{\max} - \epsilon_{b0}$ correlation
-0,137	0,804	-0,34

Для испытанных образцов наблюдается существенная взаимосвязь между прочностью и начальным модулем упругости. Взаимовлияние между

прочностью и предельными деформациями, начальным модулем упругости и предельными деформациями практически отсутствует. Однако при увеличении количества испытанных образцов значения коэффициентов корреляции могут измениться.

Так как в соответствии с СП 63.13330.2018 значения расчетного сопротивления арматуры при сжатии зависят от величины предельных деформаций бетона  $\epsilon_{b0}$ , то представляет интерес влияние различия деформационных характеристик, в особенности предельных деформаций бетона  $\epsilon_{b0}$ , на несущую способность внецентренно сжатого железобетонного элемента в зависимости от эксцентриситета продольной силы. Для оценки этого влияния с помощью нелинейной деформационной модели по методике, приведенной в пунктах 8.1.20–8.1.29 СП 63.13330.2018, была рассчитана несущая способность железобетонной колонны сечением 400 × 400 мм с симметричным армированием при эксцентриситетах продольной силы в диапазоне 1–35 см с шагом в 1 см при коэффициенте армирования 0,25, 1,0, 2,0 и 3,0 ‰ с использованием двух экспериментальных диаграмм (№ 4 и № 6 в соответствии с табл. 1). Данные образцы показали практически одинаковую прочность (20,698 и 20,673 МПа) и начальный модуль упругости (20,475 и 19,781 ГПа), но существенно отличаются по значению предельных деформаций (2,098 и 1,578 ‰). В качестве аналитической функции, аппроксимирующей экспериментальные диаграммы, использовалась формула Саржина, принятая в европейских нормах. Эта аналитическая зависимость практически полностью совпала с диаграммами, полученными в эксперименте. Диаграмма арматуры — двухлинейная по СП 63.13330.2018. Значение предельной относительной деформации арматуры при сжатии принималось равным соответствующему значению  $\epsilon_{b0}$ . На рис. 3 приведено отношение несущей способности при  $\epsilon_{b0} = 1,578 ‰ (N_1)$  к несущей способности при  $\epsilon_{b0} = 2,098 ‰ (N_2)$ . Уменьшение значения предельных деформаций при малом проценте ( $\mu = 0,25 ‰$ ) незначительно влияет на несущую способность. При этом минимальное отношение  $N_1/N_2$  равно 0,93. С ростом процента армирования и, соответственно, увеличения вклада сжатой арматуры в общую несущую способность, влияние на нее значения предельных деформаций бетона увеличивается. При  $\mu = 3 ‰$  снижение несущей способности за счет уменьшения предельных деформаций бетона составляет уже 10–15 %. Максимум снижения, который сдвигается с ростом армирования в сторону больших эксцентриситетов, соответствует такому эксцентриситету, при котором сжатая арматура вносит наибольший вклад в несущую способность.



**Рис. 3.** Отношение несущей способности при  $\varepsilon_{b0} = 1,578 \text{ ‰}$  ( $N_1$ ) к несущей способности при  $\varepsilon_{b0} = 2,098 \text{ ‰}$  ( $N_2$ ) в зависимости от процента армирования и эксцентриситета продольной силы

**Fig. 3.** The ratio of the bearing capacity at  $\varepsilon_{b0} = 1.578 \text{ ‰}$  ( $N_1$ ) to the bearing capacity at  $\varepsilon_{b0} = 2.098 \text{ ‰}$  ( $N_2$ ) depending on reinforcement percentage and eccentricity of a longitudinal force

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований получена предварительная оценка изменчивости формы диаграммы  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона при осевом сжатии.

Определенные по результатам эксперимента коэффициенты вариации предельных деформаций бетона при сжатии и начального модуля упругости бетона сопоставимы с коэффициентом вариации прочности бетона при сжатии.

Значения предельных деформаций при сжатии существенно влияют на результаты расчетов несущей способности при внецентренном сжатии. Особенно сильно это влияние проявляется при увеличении процента армирования.

Одним из вариантов уточнения результатов расчетов внецентренно сжатых железобетонных элементов может быть корректировка нормативного значения предельных деформаций бетона при сжатии с учетом случайного характера этой величины.

Настоящее исследование ввиду весьма небольшого числа испытанных образцов лишь обозначает имеющуюся проблему и не позволяет дать конкретные рекомендации по учету случайного характера деформационных характеристик бетона при расчетах железобетонных конструкций на прочность. Для этого необходим большой объем экспериментальных исследований полных диаграмм  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона и их влияния на работу железобетонных конструкций с целью накопления информации для ее дальнейшей статистической обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер В.Д. К оценке риска при проектировании с учетом износа несущих элементов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 1. С. 33–36.
2. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2016. 906 с.
3. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Оптимизация железобетонной плиты перекрытия по критерию минимальной стоимости с учетом анализа риска // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 19–22.
4. Verma S.K., Bhadauria S.S., Akhtar S. Probabilistic evaluation of service life for reinforced concrete

structures // Chinese Journal of Engineering. 2014. Vol. 2014. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2014/648438

5. *Holický M.* Assessment of existing civil engineering structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052001. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052001

6. *Jafari F., Akbari J.* Reliability-based design of reinforced concrete beams for simultaneous bending, shear, and torsion loadings // Frattura ed Integrità Strutturale. 2019. Vol. 14. Issue 51. Pp. 136–150. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.51.11

7. *Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В.* Оценка надежности железобетонных внецентренно сжатых колонн // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 61–65.

8. *Шуников Е.А.* Анализ надежности железобетонных колонн одноэтажного промышленного здания // Молодая мысль: наука, технологии, инновации : мат. VII (XIII) Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Братск, 2015. С. 62–65.

9. *Bastidas-Arteaga E.* Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Corrosion-Fatigue and Climate Change // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x

10. *Berlinov M., Berlinova M., Grigorjan A.* Operational durability of reinforced concrete structures // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 02012. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102012

11. *Rastayesh S., Mankar A., Sørensen J.D., Bahrebar S.* Development of stochastic fatigue model of reinforcement for reliability of concrete structures // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Issue 2. P. 604. DOI: 10.3390/app10020604

12. *Skrzypczak I., Słowik M., Buda-Ożóg L.* The application of reliability analysis in engineering practice — reinforced concrete foundation // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 144–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.197

13. *Słowik M., Skrzypczak I., Kotynia R., Kaszubska M.* The application of a probabilistic method to the reliability analysis of longitudinally reinforced concrete beams // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 273–280. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.214

14. *Yan X., Ren X., Li J.* Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression // Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University. 2016. Vol. 44. Issue 5. Pp. 664–670. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002

15. *Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В.* Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник Иркутско-

го государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 111–116.

16. *Свиридов Н.В., Хирнов В.В.* Особенности нормирования показателей качества бетонов высокой прочности // Технологии бетонов. 2015. № 7–8 (108–109). С. 54–61.

17. *Li X., Shan Z., Yu Z., Gao J., Mao J.* Stochastic constitutive relationship of self-compacting concrete under uniaxial compression // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2018/3157414

18. *Xiao J., Zhang K., Akbarnezhad A.* Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 181. Pp. 753–771. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.247

19. *Chen P., Liu C., Wang Y.* Size effect on peak axial strain and stress-strain behavior of concrete subjected to axial compression // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 188. Pp 645–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.072

20. *Жарницкий В.И., Беликов А.А.* Квазистатические испытания бетонных и армированных призм с целью изучения полных диаграмм сопротивления // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : науч. тр. III Всеросс. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону : в 7-ми т. Москва, 2014. С. 39–48.

21. *Безгодов И.М., Дмитренко Е.Н., Начарова А.Н.* Регулирование деформационных свойств бетона // Технологии бетонов. 2018. № 11–12 (148–149). С. 50–52.

22. *Попов В.М., Герфанова О.А., Морозов В.И.* Долговечность железобетонных конструкций // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : науч. тр. III Всеросс. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону : в 7-ми т. М., 2014. С. 356–366.

23. *Попов В.М., Плюснин М.Г.* Влияние деформационных характеристик бетона на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 83–88.

24. *Плюснин М.Г., Морозов В.И., Попов В.М., Савин С.Н., Смирнова Е.Э.* Оценка влияния эксцентриситета продольной силы на обеспеченность несущей способности сжатых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 29–34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.29-34

25. *Рахманов В.А., Сафонов А.А.* Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 120–125.

Поступила в редакцию 17 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 2 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Геннадиевич Плюснин** — заведующий лабораторией лицензирования строительных материалов; **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (КГСХА)**; 156530, пос. Караваяво, Костромская область, Учебный городок, д. 34; SPIN-code: 4729-0850, Scopus: 57191258799, ORCID: 0000-0003-1007-7186; [appraiser3@yandex.ru](mailto:appraiser3@yandex.ru);

**Сергей Валерьевич Цыбакин** — кандидат технических наук, доцент, декан архитектурно-строительного факультета; **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (КГСХА)**; 156530, пос. Караваяво, Костромская область, Учебный городок, д. 34; РИНЦ ID: 677040, ORCID: 0000-0001-5924-5406; [sv44kostroma@yandex.ru](mailto:sv44kostroma@yandex.ru).

## REFERENCES

1. Raizer V.D. Risk estimation in design procedures with due regard to bearing elements. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2016; 1:33-36. (rus.).
2. Mkrtychev O.V., Raizer V.D. *Reliability theory in the design of building structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 906. (rus.).
3. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Optimization of a reinforced concrete slab according to the criterion of minimum cost with due regard for risk analysis. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:29-34. (rus.).
4. Verma S.K., Bhadauria S.S., Akhtar S. Probabilistic evaluation of service life for reinforced concrete structures. *Chinese Journal of Engineering*. 2014; 2014:1-8. DOI: 10.1155/2014/648438
5. Holický M. Assessment of existing civil engineering structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052001. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052001
6. Jafari F., Akbari J. Reliability-based design of reinforced concrete beams for simultaneous bending, shear, and torsion loadings. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019; 14(51):136-150. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.51.11
7. Seljaev V.P., Seljaev P.V., Sorokin A.V. Evaluation of reinforced concrete eccentrically compressed columns reliability. *Regional Architecture and Construction*. 2012; 1:61-65. (rus.).
8. Shupikov E.A. Reliability analysis of reinforced concrete columns of a single-storey industrial building. *Young thought: science, technology, innovation : materials of the VII (XIII) All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists*. Bratsk, 2015; 62-65. (rus.).
9. Bastidas-Arteaga E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018; 12(1). DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x
10. Berlinov M., Berlinova M., Grigorjan A. Operational durability of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:02012. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102012
11. Rastayesh S., Mankar A., Sørensen J.D., Bahrebar S. Development of stochastic fatigue model of reinforcement for reliability of concrete structures. *Applied Sciences*. 2020; 10(2):604. DOI: 10.3390/app10020604
12. Skrzypczak I., Słowik M., Buda-Ożóg L. The application of reliability analysis in engineering practice — reinforced concrete foundation. *Procedia Engineering*. 2017; 193:144-151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.197
13. Słowik M., Skrzypczak I., Kotynia R., Kaszubska M. The application of a probabilistic method to the reliability analysis of longitudinally reinforced concrete beams. *Procedia Engineering*. 2017; 193:273-280. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.214
14. Yan X., Ren X., Li J. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*. 2016; 44(5):664-670. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002
15. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Homjakova I.V. Change in concrete structural properties under cooling and freezing. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015; 2(97):111-116. (rus.).
16. Sviridov N.V., Khimov V.V. Features of the benchmarks of quality high-strength concrete. *Concrete Technology*. 2015; 7-8(108-109):54-61. (rus.).
17. Li X., Shan Z., Yu Z., Gao J., Mao J. Stochastic constitutive relationship of self-compacting concrete under uniaxial compression. *Advances in Civil Engineering*. 2018; 2018:1-14. DOI: 10.1155/2018/3157414
18. Xiao J., Zhang K., Akbarnezhad A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 181:753-771. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.247
19. Chen P., Liu C., Wang Y. Size effect on peak axial strain and stress-strain behavior of concrete subjected to axial compression. *Construction and Building Materials*. 2018; 188:645-655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.072
20. Zharnitsky V.I., Belikov A.A. Quasistatic tests of concrete and reinforced concrete prisms in order to study full resistance diagrams. *Concrete and reinforced concrete — a look into the future : scientific works of the III All-Russian (II International) conference on con-*

crete and reinforced concrete : in 7 Vol. Moscow, 2014; 39-48. (rus.).

21. Bezgodov I.M., Dmitrenko E.N., Nacharova A.N. The regulation of the deformation properties of concrete. *Concrete Technologies*. 2018; 11-12(148-149):50-52. (rus.).

22. Popov V.M., Gerfanova O.A., Morozov V.I. Durability of reinforced concrete structures in conditions of the far north. *Concrete and reinforced concrete — a look into the future : scientific works of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete : in 7 Vol.* Moscow, 2014; 356-366. (rus.).

23. Popov V.M., Plyusnin M.G. The influence of concrete strain characteristics on the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 3(56):83-88. (rus.).

24. Plyusnin M.G., Morozov V.I., Popov V.M., Savin S.N., Smirnova E.E. Evaluation of the effect of eccentricity of longitudinal force on the provision of bearing capacity of compressed concrete elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:29-34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.29-34 (rus.).

25. Rahmanov V.S., Safonov A.A. Development of experimental evaluation methods for stress-strain diagrams of concrete under compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 3:120-125. (rus.).

Received March 17, 2020.

Adopted in a revised form on September 2, 2020.

Approved for publication October 30, 2020.

**BIONOTES:** **Mixail G. Plyusnin** — Head of the laboratory of licensing of building materials; **Kostroma State Agricultural Academy (KSAA)**; 34 Educational campus, village Karavaevo, Kostroma region, 156530, Russian Federation; SPIN-code: 4729-0850, Scopus: 57191258799, ORCID: 0000-0003-1007-7186; apraiser3@yandex.ru;

**Sergey V. Tsybakin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering; **Kostroma State Agricultural Academy (KSAA)**; 34 Educational campus, village Karavaevo, Kostroma region, 156530, Russian Federation; ID RISC: 677040, ORCID: 0000-0001-5924-5406; sv44kostroma@yandex.ru.

## Analytical calculation of deformations of a truss for a long span covering

Mikhail N. Kirsanov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The method of induction based on the number of panels is employed to derive formulas designated for deflection of a square in plan hinged rod structure, which has supports on its sides and which consists of individual pyramidal rod elements. The truss is statically determinable and symmetrical. Some features of the solution are identified on the curves constructed according to derived formulas.

**Materials and methods.** The analysis of forces arising in the rods of the covering is performed symbolically using the method of joint isolation and operators of the Maple symbolic math engine. The deflection in the centre of the covering is found by the Maxwell–Mohr’s formula. The rigidity of truss rods is assumed to be the same. The analysis of a sequence of analytical calculations of trusses, having different numbers of panels, is employed to identify coefficients, designated for deflection and reaction at the supports, in the final design formula. The induction method is employed for this purpose. Common members of sequences of coefficients are derived from the solution of linear recurrence equations made using Maple operators.

**Results.** Solutions, obtained for three types of loads, are polynomial in terms of the number of panels. To illustrate the solutions and their qualitative analysis, curves describing the dependence of deflection on the number of panels are made. The author identified the quadratic asymptotics of the solution with respect to the number of panels. The quadratic asymptotics is linear in height.

**Conclusions.** Formulas are obtained for calculating deflection and reactions of covering supports having an arbitrary number of panels and dimensions if exposed to three types of loads. The presence of extremum points on solution curves is shown. The dependences, identified by the author, are designated both for evaluating the accuracy of numerical solutions and for solving problems of structural optimization in terms of rigidity.

**KEYWORDS:** Space truss, deflection, induction, Maple, analytical solution

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N. Analytical calculation of deformations of a truss for a long span covering. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1399-1406. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1399-1406 (rus.).

## Аналитический расчет деформаций фермы пространственного покрытия

М.Н. Кирсанов

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Методом индукции по числу панелей дается вывод формул для прогиба квадратной в плане шарнирной стержневой конструкции, имеющей опоры по сторонам и состоящей из отдельных пирамидальных стержневых элементов. Ферма статически определимая, симметричная. На кривых, построенных по выведенным формулам, отмечаются некоторые особенности решения.

**Материалы и методы:** Расчет усилий в стержнях покрытия выполняется в символьной форме методом вырезания узлов с использованием операторов системы символьной математики Maple. Прогиб середины покрытия находится по формуле Максвелла – Мора. Жесткость стержней фермы принимается одинаковой. Из анализа последовательности аналитических расчетов ферм с различным числом панелей методом индукции выводятся коэффициенты в итоговой расчетной формуле для прогиба и реакций опор. Общие члены последовательностей коэффициентов находятся из решения линейных рекуррентных уравнений, составленных с помощью операторов Maple.

**Результаты:** Решения, полученные для трех видов нагрузки имеют полиномиальную по числу панелей форму. Для иллюстрации полученных решений и их качественному анализу построены кривые зависимости прогиба от числа панелей. Обнаружена квадратичная асимптотика решения по числу панелей и линейная по высоте.

**Выводы.** Получены формулы для вычисления прогиба и реакций опор покрытия с произвольным числом панелей, размерами под действием трех типов нагрузок. Показано наличие точек экстремума на кривых решения. Найденные зависимости предназначены как для оценки точности численных решений, так и для решения задач оптимизации конструкции по жесткости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пространственная ферма, прогиб, индукция, Maple, аналитическое решение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н. Analytical calculation of deformations of a truss for a long span covering // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1399–1406. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1399-1406

INTRODUCTION

The calculation of complex building structures, in particular, trusses, is traditionally performed in specialized packages, which, as a rule, are based on the finite element method [1–4]. This allows taking into account all the features of the problem, the type of loads, the property of materials, the nature of supports. In some cases, calculations enable the use of simple though sufficiently accurate models that correspond to analytical methods that are not associated with the problem of choosing the calculation accuracy typical for numerical solutions. If independent parameters of an analytical solution, written in the form of a finite formula of foreseeable complexity, have a number that determines the degree of complexity of the structure, for example, the number of panels in a truss, then such a solution is of great importance. The problem of identification and analysis of statically definable regular trusses was first raised by *Hutchinson R. G., Fleck N.A.* [5, 6]. Some theoretical problems of periodic rod structures are described in [7]. The induction method was applied to a number of regular planar trusses having a lattice structure by using computer mathematics systems; simple formulas describing dependence of deflection on the number of panels were obtained [8–14]. The calculation of arch trusses in the analytical form is given in [15–18]. A more difficult task is the problem of deformation of spatial structures [19]. A survey of papers using the induction method to derive formulas for regular structures is available in [20].

In this paper, we consider a truss (Fig. 1) consisting of  $n^2$  identical rod pyramids with a square base having height  $h$  (Fig. 2). The length of rods at the edges of the pyramid is equal to  $c = \sqrt{2a^2 + h^2}$ . All connections

in the truss are hinged, and the sides of the truss are supported by vertical posts. In angle  $A$  there is a spherical joint corresponding to three rods, in angle  $B$  there is a cylindrical joint modeled by two rods. All support rods are assumed to be non-deformable. Together with the support rods, the truss contains  $n_s = 6n^2 + 6n + 3$  rods. The number of support rods, including those that simulate angular spherical and cylindrical joints, is  $4n + 3$ . The truss is regular, and an inductive method for deriving formulas for components of the stress-strain state as functions of the number of panels is applicable to it. Consider the case of an even number of panels on the sides of the covering:  $n = 2k, k = 1, 2, \dots$

MATERIALS AND METHODS

To determine deflection in the analytical form (vertical displacement of node  $C$  in the centre of the covering) according to the Maxwell – Mohr’s formula, it is necessary to calculate the forces arising in the rods in the analytical form. Any modern computer mathematical system such as Maple, MathCad, Mathematica, Maxima, Derive, Reduce, etc. can handle this task. However, inductive generalization of solutions still requires a system that has operators for determining the General terms of sequences, the choice is limited to the two systems that are current leaders: Maple and Mathematica. Here the choice was made in favour of the Maple system [21], which has a more intuitive interface. In the language of this system, there is a software for calculating forces in the truss rods [22]. We use this software to calculate the proposed coverage. The program enters coordinates of the hinges. The coordinates of the corner points of the pyramid bases are:

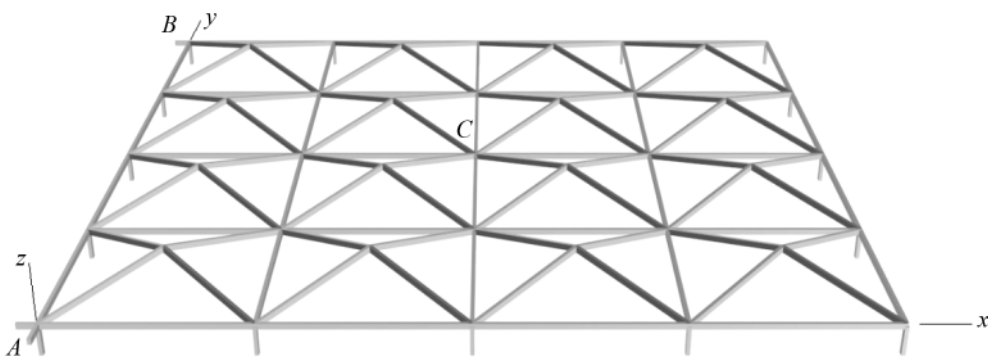


Fig. 1. The truss,  $k = 2$

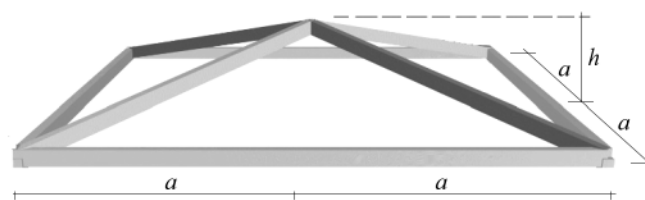


Fig. 2. Pyramid element of covering

$$x_k = 2a(i-1), y_k = 2a(j-1), z_k = f_1, \\ k = i + (j-1)(n+1), i, j = 1, \dots, n+1.$$

The coordinates of the pyramid vertices are:

$$x_k = 2a(i-1) + a, y_k = 2a(j-1) + a, z_k = f_2, \\ k = i + (j-1)n + (n+1)^2, i, j = 1, \dots, n.$$

The functions  $f_1(i, j), f_2(i, j)$  define the shape of the covering surface. In this case, these are constants  $f_1 = 0, f_2 = h$ . By changing these functions, you can get different types of surfaces of statically defined structures (Fig. 3, 4).

The reference book [23] considers 500 different types of surfaces for coverings and structures of building structures. Ellipsoidal surfaces of constructions of domes, shells and high-pressure vessels are considered in the review [24].

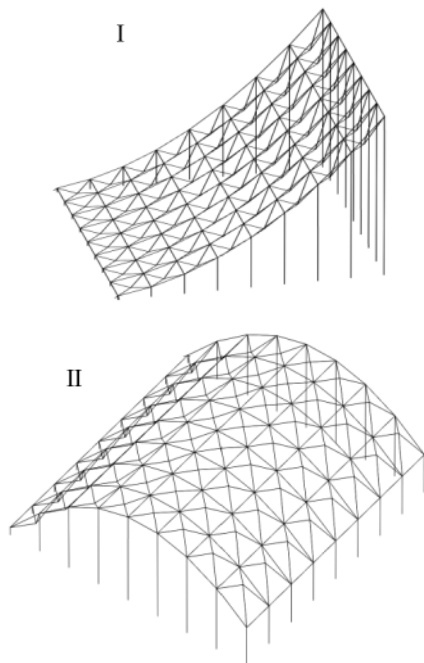


Fig. 3. Two versions of the surface: I —  $f(i, j) = hi^2$ ; II —  $f(i, j) = -h_1(j-1)(j-n-2) + h_2$

The lattice structure is organized on the basis of special ordered lists consisting of the numbers of ends of rods, just as graphs are attributed in discrete mathematics. Using data on the structure and coordinates of nodes, guiding cosines of forces that make up the matrix of the system of equilibrium equations for all nodes are calculated. This system also includes support reactions as unknown values [22].

Using the values of identified forces, deflection is calculated using the Maxwell – Mohr’s formula in the form

$$\Delta = P \sum_{j=1}^{n_s-4n-3} \frac{S_j s_j l_j}{EF}, \tag{1}$$

where  $l_j$  and  $S_j$  are the length and force in the  $j$ -th rod caused by the load,  $s_j$  is the force arising from the unit vertical force applied to the central node  $C$ ,  $E$  is the elastic modulus of the rods,  $F$  is the cross section area. Summation is performed only for deformable rods. All support rods are assumed to be rigid. In regular systems, the type of solution does not depend on its order, in this case the number of panels matter

$$\Delta = P(C_1 a^3 + C_2 c^3) / (h^2 EF). \tag{2}$$

Only  $C_1 = C_1(k), C_2 = C_2(k)$  coefficients depend on the number of panels  $k$ . Determination of these dependencies for different types of loads is one of the tasks of this work.

RESULTS

Consider the load uniformly distributed over the covering nodes. Let’s imagine it as the sum of two loads — the load on the nodes at the base of the pyramids (Fig. 4) and on their vertices (Fig. 5). By calculating the deflection using the Maxwell – Mohr’s formula (1) of a truss with a consistently increasing number of panels, we get a sequence of coefficients.

In the cycle for the number of panels  $k$ , the program outputs a sequence of coefficients before cubes  $a^3, c^3$ . The following numbers are obtained for coefficient

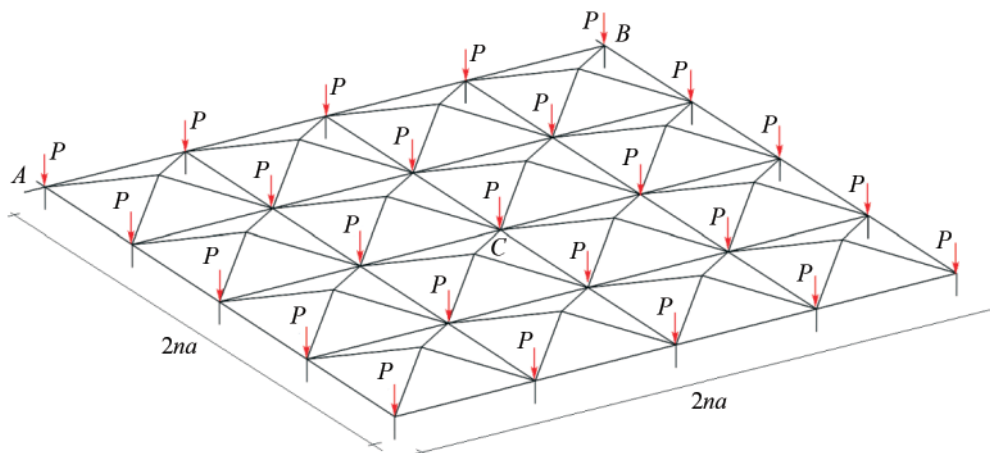


Fig. 4. Uniform loading of the pyramid bases,  $n = 4$

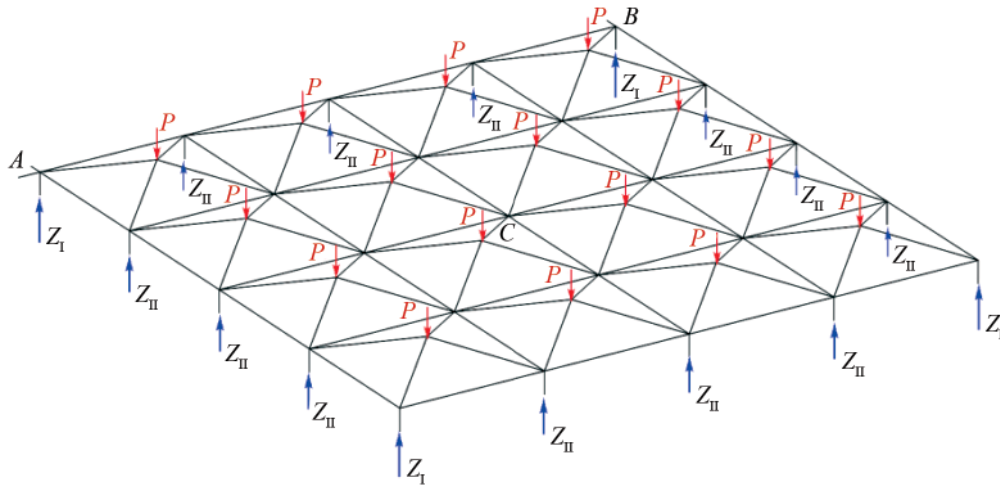


Fig. 5. The loading of the vertices of covering pyramids and the reaction of supports,  $n = 4$

$F: 3, 120, 903, 3744, 11\,275, 27\,768, \dots$ . By using these data, the *rgf\_findrecur* operator generates a sixth order recurrent equation with binomial coefficients

$$C_{1,k} = 6C_{1,k-1} - 15C_{1,k-2} + 20C_{1,k-3} - 15C_{1,k-4} + 6C_{1,k-5} - C_{1,k-6}.$$

The solution for this equation using initial data  $C_{1,1} = 3, C_{1,2} = 120, \dots, C_{1,6} = 27\,768$  represents

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

Coefficient  $C_2$  has a simpler form: 1, 16, 81, 625 ... . You don't need Maple operators to get it:  $C_2 = k^4$ .

Consider the load distributed over the panel vertices by vertical forces  $P$  (Fig. 5). The calculation shows that coefficient  $C_2$  in (2) remains the same, only coefficient  $C_1$  at  $a^3$  changes. We have the following expression

$$C_1 = k^2(k+1)(10k^2-5k+1)/3. \quad (4)$$

The split of the distributed load into two is made in order to more accurately account for the real situation, when, for example, during precipitation, the major portion of the load falls on recessed parts of the roof, and the smaller part — on its tops.

For an action of a single concentrated force in central node  $C$ , coefficients in (2) represent

$$C_1 = k(4k^2-1), \quad C_2 = k^2.$$

A linear combination of solutions for three types of loads, taking into account the arbitrariness of the number of panels, allows us to apply the obtained formulas for a fairly wide class of problems.

Resulting formulas are checked by comparing them with the numerical solution.

In the process of deriving formulas for deflection, forces in all rods were obtained in the analytical form. Here are the values of the support reactions. When all surface nodes (Fig. 4, 5) are exposed to the combined action of loads, reactions of angular supports represent common members of the following se-

quence:  $-3, 13, 45, 93, 157, \dots$ . Recurrent equation  $Z_{1,k} = 3Z_{1,k-1} - 3Z_{1,k-2} + 3Z_{1,k-3}$  is obtained using Maple system operator *rgf\_findrecur*. The solution of the equation has the form  $Z_1 = P(8k^2 - 8k - 3)/4$ . It should be noted that only when  $k = 1$ , the reaction of the support is less than zero, i.e. the support rod is compressed and the support supports the covering, in all other cases the support acts as a holding bond. The reactions of the supports located on the sides of the covering are equal, and the formula depending on the number of panels is simple:  $Z_{II} = -P(1 + 4k)/2$ .

The distribution of forces in the rods (Fig. 6), if caused by the action of the uniformly distributed load over all nodes, shows that all the rods along the contour of the covering are compressed (highlighted in blue), some of the rods of pyramid ribs are compressed, and some are stretched (highlighted in red). The thickness of rod segments is proportional to the moduli of the forces. The numbers show the values of the forces referred to the  $P$  value.

If all nodes of the covering are loaded, the formula deflection has the form (2), where  $C_2 = k^4$ , and  $C_1$  coefficient is the sum of solutions (3) and (4)

$$C_1 = k^2(2k-1)(10k^2+10k+1)/3.$$

Let's make graphs for this solution. We fix the length of side  $L = na2$  of the cover and the total load  $P_{sum} = P((n+1)^2 + n^2)$ . Let's designate the value of dimensionless deflection  $\Delta' = \Delta EF / (P_{sum} L)$ . The dependence of the deflection on the number of panels (Fig. 7) shows that the growth of deflection accompanied by an increase in the number of panels depends on truss height  $h$ . For small  $h$ , the curve has a minimum, which means that in this case it is possible to optimize the structure in terms of rigidity by choosing the optimal number of panels. Here, for  $h = 2$  m, the optimal number of panels is  $n = 2k = 10$ , which corresponds to size  $a = 2.5$  m.

The analytical form of the solution allows using Maple to find the quadratic asymptotics of the curves:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' / k^2 = h / (4L)$ .

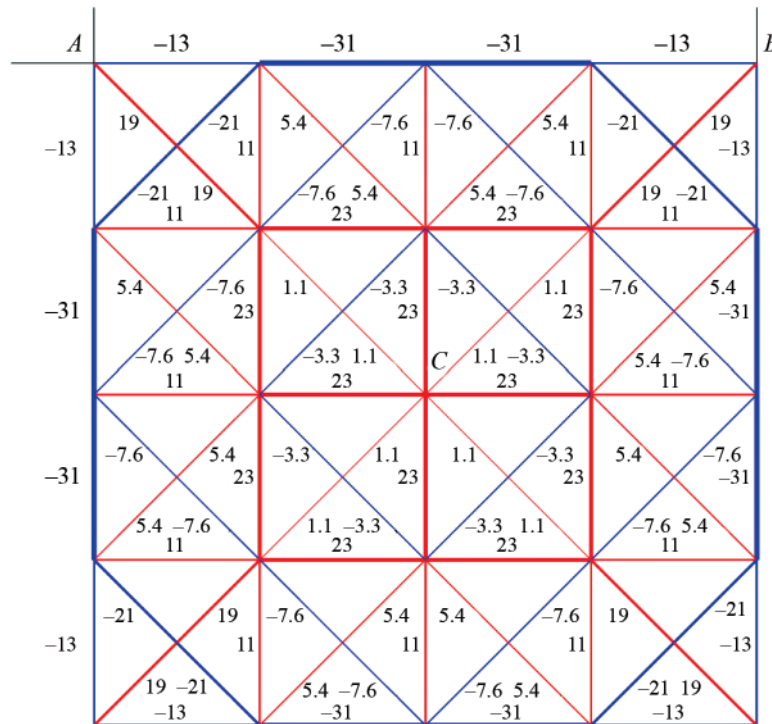


Fig. 6. Distribution of forces in the covering rods,  $n = 4$ ,  $h = 1$  m,  $a = 3$  m

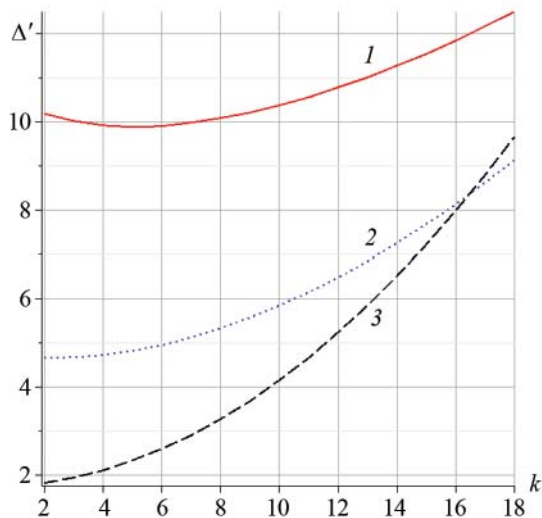


Fig. 7. Dependence of deflection on the number of panels,  $L = 50$  m: 1 —  $h = 2$  m; 2 —  $h = 3$  m; 3 —  $h = 5$  m

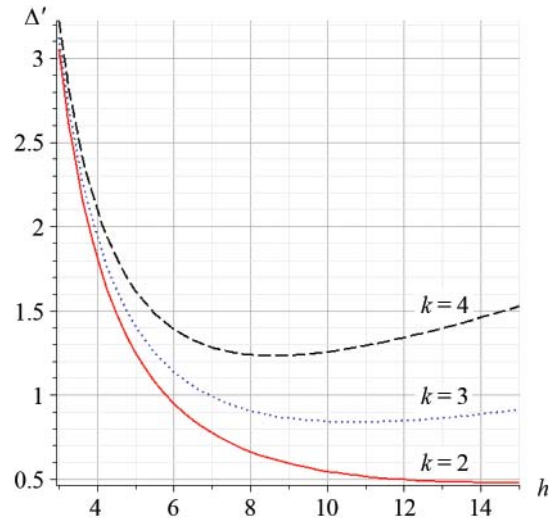


Fig. 8. Dependence of deflection on the height of the truss,  $L = 50$  m

The dependence of the solution on the height is nonlinear (Fig. 8). With an increase in the height of the truss with a small number of panels, its deflection naturally decreases, however, for  $k > 2$ , after a certain value of the height, the deflection begins to grow. The asymptotics is linear here. The angle of inclination of the asymptotes is

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \Delta' / h = \frac{2k^4}{(8k^2 + 4k + 1)L}$$

Let us also focus on a characteristic of the analytical calculation of 3D structures. The Maple system, like other systems of symbolic mathematics, has an extremely low pace of transformations, which is invisible when calculating planar trusses containing a small number of rods [8–18]. As for 3D problems, the increase in the number of structure elements accompanied by an increase in the number of panels is quadratic if this number of panels is calculated on both sides of the structure. That is why, here, during the in-

duction process, the computation time increased so that if the first calculations of  $k = 1, 2, 3$  took seconds and minutes, then for  $k > 5$ , they take hours and even days to complete the computation and obtain the formula (2). The use of the latest versions of Maple, theoretically having an algorithm for parallelizing the counting process by individual cores, does not help here either. It was possible to calculate the coefficients only due to the simple intuitively clear form of coefficient  $C_2$ . Coefficient  $C_1$  was calculated in the numeric form, in which the system works quickly at  $a = 1.0$  m as the difference between (2) and the value of  $C_2 c^3$ . The corresponding operator of the Maple program has the form

$$C1 [k]: = \text{round}(\text{del} * h^2 - k^4 * c^3).$$

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The proposed 3D truss design is distinguished by the presence of many supports that do not contradict its static determinability. The mathematical model

of the structure made it possible, using the inductive method in the system of computer mathematics, to obtain relatively simple formulas to identify dependence of deflection on the number of panels, allowing asymptotic analysis. Unfortunately, the extreme points found in solution points cannot be obtained in the analytical form. However, the very fact of their existence gives optimism for obtaining optimal solutions when choosing the size of a structure based on an increase in its rigidity. It is also noticed that corner supports exposed to the vertical load on the truss do not have a supporting role, but a holding one, since these support rods have positive (tensile) forces. This makes designers to design retaining ties at the corner points, for example, in the form of cables with anchors at the base. It was also found that for a uniformly distributed load, responses of all supports (except for angular ones) are equal. This fact can greatly simplify the design, since all support elements can have the same section and height.

## REFERENCES

1. Villegas L., Moran R., Garcia J. J. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses. *Engineering Structures*. 2019; 184:495-504. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.114
2. Dong L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020; 173:105460. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105460
3. Mathieson C., Roy K., Clifton G., Ahmadi A., Lim J.B.P. Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with HRC connectors. *Engineering Structures*. 2019; 201:109741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109741
4. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and fem-modelling. *Advanced Materials Research*. 2014; 945-949:1211-1215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.1211
5. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
6. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
7. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016; 96:184-203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007
8. Sud I.B. Derivation of formulas for deflection of the girder truss with an arbitrary number of panels in the maple system. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 2(25): 25–32. (rus.).
9. Terze S.V. Analytical calculation of the dependence of cantilever rack deformations on the number of panels in the maple system. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 2(25):16-24. (rus.).
10. Vorobiev O.V. About methods of obtaining analytical solution for eigenfrequencies problem of trusses. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 1(24):25-38. (rus.).
11. Belyankin N.A., Boyko A.Yu. Formulas for the deflection of a beam girder with an arbitrary number of panels under uniform loading. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 1(20): 21-29. (rus.).
12. Tkachuk G.N. The formula for the dependence of the deflection of an asymmetrically loaded planar truss with reinforced braces on the number of panels. *Structural mechanics and structures*. 2019; 2(21):32-39. (rus.).
13. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Analytical calculation and analysis of planar springel truss. *Structural mechanics and structures*. 2018; 2(17):72-79.
14. Kirsanov M.N. *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK. 2019; 206.
15. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The dependence of the deflection of the arched truss loaded on the upper belt, on the number of panels. *Science Almanac*. 2017; 2-3(28):268-271. DOI: 10.17117/na.2017.02.03.268 (rus.).
16. Kazmiruk I.Yu. On the arch truss deformation under the action of lateral load. *Science Almanac*. 2016; 3-3(17):75-79. DOI: 10.17117/na.2016.03.03.075 (rus.).

17. Bolotina T.D. The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2016; 4-3(8):7-8.
18. Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2016; 2-1(6):10-12.
19. Kirsanov M.N. Analytical study on the rigidity of statically determinate spatial truss. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(2):165-171. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.165-171 (rus.).
20. Tinkov D.V. Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 57(5):66-73. DOI: 10.5862/MCE.57.6 (rus.).
21. Greene R.L. *Classical Mechanics with Maple*. Springer-Verlag New York, 1995; 174. DOI: 10.1007/978-1-4612-4236-9
22. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 15(4): 510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
23. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. *Encyclopedia of Analytic Surfaces*. Librocom, 2019; 560.
24. Krivoshapko S.N. Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks. *Applied Mechanics Reviews*. 2007; 60(6):336-355. DOI: 10.1115/1.2806278

Received April 20, 2020.

Adopted in a revised form on June 17, 2020.

Approved for publication July 31, 2020.

**BIONOTES:** **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of robotics, mechatronics, dynamics and strength of machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RISC: 118571; C216@ya.ru.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Villegas L., Moran R., Garcia J.J. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 184. Pp. 495–504. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.114
2. Dong L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 173. P. 105460. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105460
3. Mathieson C., Roy K., Clifton G., Ahmadi A., Lim J.B.P. Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with HRC connectors // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 201. P. 109741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109741
4. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinenikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and fem-modeling // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 945–949. Pp. 1211–1215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.1211
5. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
6. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
7. Zok F.W., Lature R.M., Begley M.R. Periodic truss structures // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016. Vol. 96. Pp. 184–203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007
8. Суд И.Б. Вывод формул для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей в системе maple // *Строительная механика и конструкции*. 2020. Т. 2. № 25. С. 25–32.
9. Терзе С.В. Аналитический расчет зависимости деформаций консольной стойки от числа панелей в системе maple // *Строительная механика и конструкции*. 2020. Т. 2. № 25. С. 16–24.
10. Воробьев О.В. О методах получения аналитического решения для проблемы собственных частот шарнирных конструкций // *Строительная механика и конструкции*. 2020. Т. 1. № 24. С. 25–38.
11. Белянкин Н.А., Бойко А.Ю. Формулы для прогиба балочной фермы с произвольным числом панелей при равномерном нагружении // *Строительная механика и конструкции*. 2019. Т. 1. № 20. С. 21–29.
12. Ткачук Г.Н. Формула зависимости прогиба несимметрично нагруженной плоской фермы с усиленными раскосами от числа панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2019. Т. 2. № 21. С. 32–39.
13. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Analytical calculation and analysis of planar springel truss // *Structural mechanics and structures*. 2018. Vol. 2. № 17. Pp. 72–79.

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

15. *Рахматулина А.Р., Смирнова А.А.* О зависимости прогиба арочной фермы, нагруженной по верхнему поясу, от числа панелей // Научный альманах. 2017. № 2–3 (28). С. 268–271. DOI: 10.17117/па.2017.02.03.268

16. *Казьмирук И.Ю.* О деформации арочной фермы под действием боковой нагрузки // Научный альманах. 2016. № 3–3 (17). С. 75–79. DOI: 10.17117/па.2016.03.03.075

17. *Bolotina T.D.* The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels // Bulletin of Scientific Conferences. 2016. № 4–3(8). С. 7–8.

18. *Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu.* Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss // Bulletin of Scientific Conferences. 2016; 2–1(6). С. 10–12.

19. *Кирсанов М.Н.* Аналитическое исследование жесткости пространственной статиче-

ски определяемой фермы // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2 (101). С. 165–171. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.165-171

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

21. *Greene R.L.* Classical Mechanics with Maple. Springer-Verlag New York, 1995. 174 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-4236-9

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

23. *Krivoshapko S.N., Ivanov V.N.* Encyclopedia of Analytic Surfaces. Librocom, 2019. 560 p.

24. *Krivoshapko S.N.* Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks // Applied Mechanics Reviews. 2007. Vol. 60. Issue 6. Pp. 336–355. DOI: 10.1115/1.2806278

Поступила в редакцию 11 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 14 октября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

О Б А В Т О Р Е: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; РИНЦ ID: 118571; c216@ya.ru.

## Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов

С.С. Иноземцев, До Тоан Чонг

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящий момент не существует единой методологии контроля способности материала к самовосстановлению, так как отсутствуют критерии, характеризующие способность материала самостоятельно реагировать на условия и предпринимать меры по ликвидации неблагоприятного эффекта для свойств или структуры материала. Все методы оценки самовосстанавливающейся способности материалов сводятся к расчету коэффициента относительного изменения измеряемого показателя. «Самовосстанавливающийся» материал — это материал, способный инициировать процесс по ликвидации структурных дефектов, скорость протекания которого превышает скорость их самопроизвольного роста, а стойкость к эксплуатационным условиям сформированной структуры не меньше первоначальной. Разработка решений, позволяющих реализовать указанный принцип, даст возможность увеличить срок эксплуатации материалов.

**Материалы и методы.** Использован комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, патентах, научных статьях и отчетах.

**Результаты.** Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетоне сопряжена с его структурными особенностями и термопластичными свойствами. Результат процесса самозалечивания — восстановление целостности структуры физико-химических связей посредством смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул, обеспечивающего упрочнение. Равномерность процесса самовосстановления в объеме материала может быть достигнута с помощью технологии инкапсулирования функциональных агентов и введения их в состав совместно с другими компонентами на стадии приготовления асфальтобетонной смеси.

**Выводы.** Существующие технические решения позволяют получать капсулы, содержащие восстанавливающий агент до 90...94 % от общего объема. Необходимо формулирование общих требований и показателей качества самовосстанавливающихся материалов для строительства, характеризующих степень их эффективности в зависимости от условий применения. Положения теории адгезии могут быть использованы при реализации технологии самовосстановления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** самовосстановление, асфальтобетон, дорожное покрытие, капсулы, умный материал, адгезия

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00262).*

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Иноземцев С.С., До Тоан Чонг. Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1407–1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424

## Technology of self-healing road pavements: current status and development prospects

Sergei S. Inozemtcev, Toan Trong Do

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Presently, there exists no unified methodology that could control self-healing properties of materials due to the lack of criteria characterizing the ability of materials to respond to impacts and to cope with adverse effects produced on their properties or structure. All assessment methods applied to self-healing properties of materials are reduced to the calculation of the ratio of relative changes in the value of parameters to be measured. A “self-healing” material is a material capable of initiating liquidation of structural defects, so that the rate of this process could exceed the one of spontaneous propagation of defects, while the resistance of the new structure to operating loads is not lower than the initial one. Development of solutions, capable of implementing this principle, will ensure longer service lives of materials.

**Materials and methods.** A set of general methods of logical research was applied. These methods are based on the theoretical analysis of process solutions presented in professional editions, information resources maintained by their developers and in mass media, patents, research articles and reports.

**Results.** The self-healing technology is applicable to asphalt concrete with regard for its structural features and thermoplastic properties. Self-healing means restoration of the structural integrity of physical and chemical bonds by moistening crack

surfaces, diffusion of molecules between them, and arbitrary dissipation of molecules to ensure reinforcement. Self-healing process uniformity is attainable by applying the technology of functional agent encapsulation so that it could be added to the mix along with other components at the stage of the asphalt concrete mix preparation.

**Conclusions.** Existing technological solutions can generate capsules that contain the recovery agent in the amount of up to 90...94 % of the total volume. General requirements and quality standards that apply to self-healing materials, used in construction, must be developed to identify their efficiency depending on application conditions. Provisions of the adhesion theory can be applied to the self-healing technology in the course of its implementation.

**KEYWORDS:** self-healing, asphalt concrete, road pavement, capsules, smart material, adhesion

*The study was funded by the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 19-79-00262).*

**FOR CITATION:** Inozemtcev S.S., Toan Trong Do. Technology of self-healing road pavements: current status and development prospects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике одной из актуальных тематик проводимых исследований является поиск технологических решений, направленных на повышение долговечности строительных материалов, приводящей к увеличению периода эксплуатации изделия или конструкции. Условия эксплуатации естественно варьируются в широком диапазоне как по видам факторов, так и по их интенсивности. Для дорожных строительных материалов характерны следующие факторы: статические или динамические механические нагрузки, периодичность климатических условий (температура, влажность, ультрафиолет, кислород и др.), воздействие антропогенных и естественных химических и биологических агентов. Вследствие высокой вариативности суперпозиции воздействия факторов, как правило, предлагаются технологические решения, нацеленные на нивелирование влияния только некоторых факторов, считающихся ключевыми. На практике восстановление работоспособности изделий и конструкций достигается посредством организационных мероприятий (ремонтно-восстановительные работы), сопровождающихся закономерными экономическими затратами.

С развитием строительной отрасли возрастает потребность в использовании материалов, обладающих уникальным набором свойств, которые способствуют как увеличению функциональной эффективности конструкций, так и снижению материалоемкости производства. Перспективное решение в области материаловедения, ориентированное на увеличение долговечности конструкций, — создание «умных» материалов (smart materials), способных в процессе эксплуатации контролируемо изменять свойства под влиянием искусственных воздействий или естественных эксплуатационных факторов [1, 2]. Главным условием классификации материала как «умного» служит обеспечение контролируемых изменений структуры, свойств или функционального состояния, интенсивность которых прогнозируется на стадии проектирования состава материала, а реализация происходит в процессе производства. Для дорожного строительства

перспективный вид умных материалов — это материалы, обладающие способностью восстанавливать собственную функциональность в конструкции, предусмотренной его назначением, которую принято называть «самовосстановлением» или «самозалечиванием» (self-healing) [3].

Однако у механизмов деструкции материала существенно меньше вариативности факторов, что позволяет предполагать возможность разработки новых технологических решений, направленных на устранение последствий неблагоприятного структурообразования материала в эксплуатационный период. В частности, результатом процесса накопления и развития дефектов является образование и рост трещин до критических размеров, после достижения которых начинается самопроизвольный их рост (последнее четко показано А.А. Гриффитсом в 1920 г. [4]). В этой связи естественным и принципиальным решением служит размещение в объеме материала фазы, способной ликвидировать трещины и не быть подверженной или мало подверженной к деструкции в условиях эксплуатации материала. При этом важно отметить, что вследствие структурных ограничений запас восстанавливающей фазы должен проектироваться на стадии разработки материала и локализоваться в зонах, подверженных интенсивному трещинообразованию.

Важно конкретизировать термин «самовосстанавливающийся» материал. Как правило, кинетика изменения структурно-чувствительного параметра  $F$  материала описывается дифференциальным уравнением [5]:

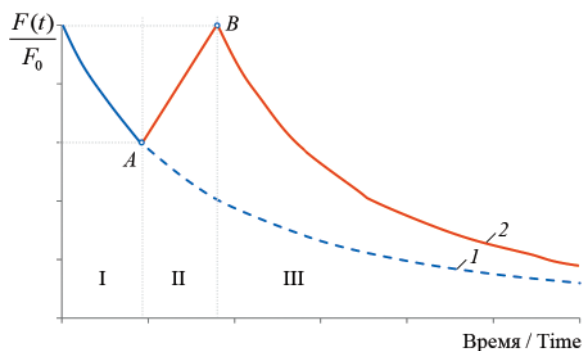
$$\frac{dF}{dt} = -k_t F^n,$$

а его решение имеет вид:

$$\frac{F(t)}{F(0)} = \sqrt[n]{1 - k_t \frac{1-n}{F(0)^{1-n}} t}, \quad (1)$$

где  $F(0)$  — значение структурно-чувствительного параметра в начальный период времени;  $n, k_t$  — энергетическая и кинетическая константы;  $t$  — время.

Кинетика изменения значения структурно-чувствительного параметра для обычного и самовосстанавливающегося материала представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема кинетики изменения структурно-чувствительного параметра: 1 — обычного; 2 — самовосстанавливающегося материала

**Fig. 1.** The graph describing the kinetics of changes in a structure sensitive parameter: 1 — of a regular material; 2 — of a self-healing material

Для обычного материала изменение структурно-чувствительного параметра в течение эксплуатации описывается в соответствии с формулой (1), для которой энергетическая и кинетическая константы  $n_1$  и  $k_{11}$  характеризуют интенсивность процесса деструкции. Описание для самовосстанавливающегося материала отличается наличием трех стадий изменения структурно-чувствительного параметра. На стадии I изменение структурно-чувствительного параметра  $F(t)_1/F(0)$  также можно описать с помощью зависимости (1). Однако в момент наступления минимального допустимого значения структурно-чувствительного параметра, в соответствии с которым проектируется состав материала, наступает II стадия самовосстановления материала. Учитывая, что скорость протекания этого процесса должна быть минимальной, его описание может быть выполнено с помощью линейной зависимости  $F(t)_2/F(0) = a(t - t_c) + F(t)_1/F(0)$ , где  $a$  — скорость процесса самовосстановления;  $t_c$  — время, при котором достигается критическое значение  $F(t_c)$  и возникает необходимость реализации мер по восстановлению материала. Момент времени  $t_c$  является оптимальным для начала процесса самовосстановления, эффективность которого определяется коэффициентом  $a > 0$ . После завершения этапа самовосстановления изменение структурно-чувствительного параметра на стадии III также описывается уравнением (1), для которого эффективность самовосстановления будет обеспечиваться при значениях энергетической и кинетической констант  $n_2 \leq n_1$  и  $k_{12} \leq k_{11}$ .

Анализ уравнений показывает, что скорость достижения критического состояния материала, характеризующегося его функциональным отказом и необходимостью устранения дефектов, возрастает с увеличением энергетической и кинетической кон-

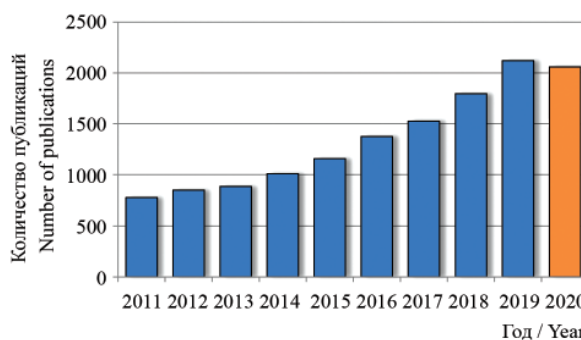
стант. При этом долговечность материалов обеспечивается при  $n$  и  $k_i \rightarrow 0$ .

В этой связи «самовосстанавливающийся» материал — это материал, способный инициировать процесс по ликвидации структурных дефектов, скорость протекания которого превышает скорость их самопроизвольного роста, а стойкость к эксплуатационным условиям сформированной структуры не меньше первоначальной.

Таким образом, разработка решений, позволяющих реализовать указанный принцип, который даст возможность увеличить срок эксплуатации материалов, является актуальной задачей исследований в области материаловедения, в том числе в направлении дорожного строительства.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Тенденция развития научных изысканий в области технологии самовосстановления показывает (рис. 2), что в данном направлении количество публикаций с каждым годом увеличивается, из которых доля работ в области дорожных материалов к 2019 г. достигла 3,3 %.



**Рис. 2.** Изменение количества публикаций по направлению «self-healing» (по данным www.scopus.com от октября 2020 г.)

**Fig. 2.** A change in the number of publications covering the issue of “self-healing” (as of October, 2020, www.scopus.com)

В строительном материаловедении технологии, предусматривающие самовосстановление, применяются как в полимерных материалах, так и бетонах на основе гидравлических или органических вяжущих. Закономерно, что для различных типов строительных материалов механизм самовосстановления различен [7–11]. При этом как традиционные цементные бетоны, так и полимербетоны и асфальтобетоны могут обладать собственным потенциалом к самовосстановлению.

Традиционно в составе бетона цемент занимает от 10 до 30 % объема, из которых 20–30 % остается негидратированным. Количество цемента в объеме

бетона, не вступившего в реакцию, зависит от степени дисперсности цемента и водоцементного соотношения. В процессе эксплуатации конструкций из такого бетона в условиях естественного трещинообразования внутрь материала может проникать вода, которая, воздействуя на зерна цемента, будет способствовать гидратации, продукты ее реакции, заполняя трещины, обеспечат эффект самовосстановления структуры [12]. Проблемой реализации технологии, учитывающей гидратационный потенциал цементных зерен внутри бетона, является сложность прогнозирования доступа необходимого количества воды для запуска процесса и прогнозирования степени гидратации, необходимой для образования продуктов реакции, достаточных для купирования единицы объема дефекта, поры.

Однако особенности гидратационного потенциала могут быть использованы при производстве асфальтобетона на основе наполнителя с применением цемента, когда проникающая под битумные пленки вода содействует началу процесса гидратации и образующиеся кристаллы гидросиликатов, пронизывая пленку, увеличивают сцепление и препятствуют ее отслоению [13].

Большее распространение среди решений, направленных на самовосстановление, получили разработки с использованием алкалофильных эндоспорообразующих бактерий [14–20], запускающие процесс биоминерализации бетона с последующим осаждением кальцита [21]. Для обеспечения восстанавливающего процесса используются бактерии рода *Bacillus*, которые в составе бетона присутствуют совместно с кальциевой солью молочной кислоты (лактатом кальция) и питательными добавками [22–24]. Бактерии начинают свою жизнедеятельность после взаимодействия с водой, расходуют кислород, питаются лактатом кальция, который впоследствии преобразуется в карбонат кальция. Таким образом, растворимый лактат кальция преобразуется в нерастворимый кальцит, который в результате способствует купированию трещин и пор внутри материала, препятствуя прониканию влаги и повышая морозостойкость [25]. При этом расходование кислорода бактериями дополнительно содействует повышению коррозионной устойчивости армирующих элементов [26].

Для предотвращения преждевременной активации процесса жизнедеятельности применяются бактериальные носители, которые концентрируют в себе споры и предотвращают их контакт с водой затворения цемента в процессе приготовления бетонной смеси.

В работах [27] в качестве носителя бактерий использовался керамзитовый наполнитель, который насыщался совместно с раствором питательной среды и добавлялся в состав бетонной смеси как заполнитель. Однако невысокая прочность используемого заполнителя приводит к снижению предела прочности при сжатии бетона до 50 %.

Альтернативным способом инкапсулирования спор бактерий и питательных веществ является гидрогель, обладающий способностью поглощать и удерживать влагу [28]. Представленный метод инкапсулирования позволил за счет купирования карбонатом кальция трещин шириной до 0,5 мм снизить водопроницаемость на 68 %.

Наибольшее распространение среди способов инкапсулирования восстанавливающих агентов получили различного вида капсулы, изготовление которых осуществляется на основе полимерных соединений, формирующихся при отверждении капсулы [29–33].

Основная проблема применения капсул с восстанавливающим агентом — снижение физико-механических свойств бетона. Кроме того, с учетом большого количества различных методик синтеза инкапсулированных модификаторов для самовосстановления, в настоящий момент отсутствует достаточно данных, подтверждающих улучшение физико-механических свойств после восстановления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетоне сопряжена с его структурными особенностями и термопластичными свойствами. Учитывая особенности свойств битума, увеличение прочностных характеристик асфальтобетона, установленных нормативными документами, не обеспечивает его долговечность в эксплуатационных условиях [34–36]. При этом повышение предела прочности асфальтобетона при высоких температурах закономерно приводит к увеличению предела прочности при отрицательных температурах, что отрицательно отражается на его хрупкости.

Поэтому обеспечение баланса между максимальной прочностью при положительных температурах с минимальной хрупкостью будет одним из условий обеспечения долговечности. Долговечность, представляемая максимальным возможным сроком эксплуатации асфальтобетонного покрытия, в период которого сохраняется его эксплуатационная пригодность и не осуществляются его ремонт или восстановление, достигается за счет неизменности или постоянства состояния структуры материала, которое в течение времени обеспечивает способность в равной степени реагировать на внешние воздействующие факторы без образования дефектов. При этом в процессе эксплуатации дорожного покрытия под воздействием погодноклиматических факторов и нагрузки автомобильного транспорта в асфальтобетоне происходят необратимые процессы, приводящие к образованию дефектов и нарушению сплошности структуры.

Долговечность асфальтобетона обратно пропорциональна скорости протекания деструктивных процессов и их интенсивности. Таким образом,

для обеспечения увеличения сроков службы асфальтобетонного покрытия необходим поиск научно обоснованных решений, позволяющих в период эксплуатации обеспечить длительность состояния структуры асфальтобетона без дефектов за счет придания ему уникальных свойств, дающих возможность самостоятельно восстанавливать целостность композита и его способность сопротивляться внешним воздействующим факторам.

Традиционным решением, обеспечивающим продление срока службы асфальтобетонного покрытия, является применение различного рода пропиток, которые используются на этапе эксплуатации с целью предотвращения развития первичных дефектов [37–41]. Пропитывающие составы после обработки поверхности асфальтобетонного покрытия диффундируют внутрь материала, восстанавливая молекулярный состав битумного вяжущего, что приводит к снижению жесткости [42, 43].

Основным компонентом таких пропитывающих составов, омолаживателей (rejuvenator), выступают низкомолекулярные органические соединения, которые, растворяясь в битуме, компенсируют потери мальтеновых фракций при старении в процессе эксплуатации [44–51].

Однако, в зависимости от реологических свойств, омолаживающих состав, их проникающая способность в объем асфальтобетонного покрытия не превышает 20 мм [52], в результате чего эффект восстановления распространяется только на приповерхностные слои покрытия. Необходимость остановки дорожного движения также является недостатком технологии восстановления состояния асфальтобетонного покрытия с помощью пропитывающих омолаживающих составов.

Использование функциональных контейнеров, содержащих омолаживающие, восстанавливающие составы или модификаторы, в виде капсул или полых волокон, позволяет избавиться от указанных недостатков. Реализация подобного решения дает возможность асфальтобетону в процессе эксплуатации самостоятельно реагировать на изменение структуры с целью восстановления функционального состояния, что разрешает относить этот материал к категории «умных» со способностью самовосстановления.

Стоит отметить, что битум как компонент в составе асфальтобетона обладает собственным потенциалом к самовосстановлению, который зависит как от физических, так и химических свойств [53]. Самовосстановление вяжущего в асфальтобетоне проявляется в период отсутствия динамического воздействия, которое направлено на восстановление усталостных повреждений в материале. Степень восстановления в этом случае будет определяться временем отдыха от повторных нагрузок [53–55].

Результатом процесса самозалечивания служит восстановление целостности структуры физико-

химических связей по средствам: смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул, обеспечивающего упрочнение [56, 57]. В битуме самозалечивание может происходить на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей (reversible hydrogen bonding) с образованием новых швов и цепей [57–59] через дитопические и три-топические молекулы [59]. Интенсивность процесса восстановления в битуме будет зависеть от температурных условий, в которых он будет находиться в период отдыха от повторных нагрузок. Чем выше температура битума, тем процесс восстановления протекает более интенсивно. Эта особенность битума используется при повторной переработке асфальтобетона (recycling).

Собственный потенциал самовосстановления битума используется при реализации технологии индукционного восстановления асфальтобетонного покрытия, которая была разработана в Делфтском технологическом университете (Delft University of Technology) [61]. В соответствии с трудами [62–64], в состав асфальтобетона вводится 5–7 % металлической фибры, которая в покрытии подвергается воздействию высокочастотного переменного электромагнитного поля с помощью специальной индукционной установки и нагревается. В процессе нагревания металлических волокон битум вокруг них расплавляется выше температуры размягчения, и происходит восстановление, дефекты в вяжущем ликвидируются [54, 65, 66]. При этом повторять процесс «залечивания» допустимо минимум пять раз с равной степенью восстановления (рис. 3).

Недостатком такой технологии является температурный градиент по толщине асфальтобетонного покрытия, который возникает при индукционном нагреве (рис. 4).

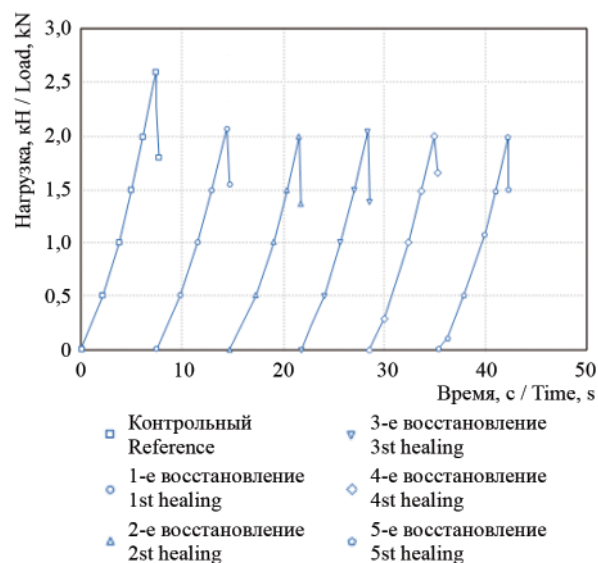


Рис. 3. Кинетика изменения максимальной нагрузки [63]

Fig. 3. Maximum load change kinetics [63]

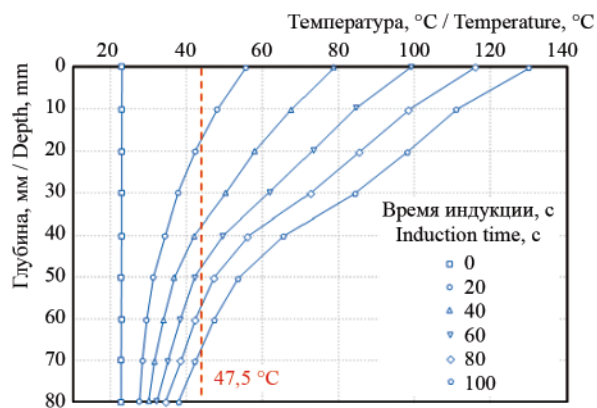


Рис. 4. Зависимость вертикального распределения температуры длительности индукционного нагрева [64]

Fig. 4. Dependence of vertical temperature distribution on induction heating time [64]

Так, с увеличением времени индукционного воздействия мощностью 8,3 кВт и частотой 123 кГц на образец разница температуры на поверхности и в объеме на глубине 80 мм может достигать более 90 °C. При этом на максимальном удалении от источника индукционного воздействия температура материала, оптимальная для восстановления, принятая равной температуре размягчения битума — 47,5 °C, не достигается даже при максимальной продолжительности воздействия [64].

Таким образом, использование индукционного нагрева для восстановления на всю толщину асфальтобетонного покрытия в настоящий момент не является реализуемым. Необходимость разработки специального индукционного оборудования увеличивает стоимость производственного внедрения технологии.

Равномерность процесса самовосстановления в объеме материала может быть достигнута с помощью технологии инкапсулирования функциональных агентов и введения их в состав совместно с другими компонентами на стадии приготовления асфальтобетонной смеси. Однако применение решений использования инкапсулированных модификаторов или бактерий в асфальтобетоне сопряжено с рядом технологических особенностей приготовления асфальтобетонной смеси.

К капсулам, содержащим восстанавливающий агент, также предъявляются требования по термостойкости и прочности скорлуп, необходимых для сохранения целостности на этапе уплотнения асфальтобетонной смеси, а использование карбонатпроизводящих бактерий, как модификатора, невозможно, так как они не выживут при температуре приготовления асфальтобетонной смеси от 140 до 185 °C.

Для производства микрокапсул для асфальтобетона, содержащих восстанавливающий агент,

существуют различные технологии, которые отличаются применяемыми исходными компонентами, сложностью технологического процесса и свойствами продукта.

В работе [67] применяется технология двухстадийной коацервации для изготовления микрокапсул на основе форполимера метанол-меламин-формальдегида, модифицированного метанолом. Технология использования меламин-формальдегида при производстве капсул с омолаживающим агентом является небезопасной с точки зрения экологии [68].

В исследовании [69] рассмотрены варианты получения оболочки капсул для эмульгированного восстанавливающего агента в воде из целлюлозы и полимера.

Авторами [70] предложен трехстадийный способ получения микрокапсул, в котором на первом этапе стирол-малеиновый ангидрид в течение 2-х часов перемешивается с водой, нагретой до 50 °C, а затем в полученный раствор после доведения pH до 10 с помощью NaOH вводится восстанавливающий агент. На втором этапе в полученную эмульсию добавляют метанол-меламин-формальдегид и, перемешивая с заданной интенсивностью, нагревают до 80 °C со скоростью 2 °C в минуту. На заключительном этапе для полимеризации оболочки эмульсия выдерживается 2 часа при 80 °C, после чего полученные капсулы фильтруют и сушат в вакуумной печи.

В работе [71] так же предложена многостадийная технология капсуляции восстанавливающего агента, в которой эмульгированный в воде восстанавливающий агент покрывается оболочкой из мочевины и формальдегида.

Наиболее технологически несложный способ получения микрокапсул предложен авторами [72]. При постоянной скорости перемешивания в воду последовательно добавляются альгинат натрия и восстанавливающий агент. С помощью капельной воронки полученная суспензия делится на отдельные капсулы через раствор хлорида кальция. После фильтрации капсулы сушатся при температуре 40 °C.

Для изготовления кальций-альгинатных капсул использовался альгинат натрия ( $C_6H_7O_6Na$ ), представляющий собой натриевую соль альгиновой кислоты, экстрагированной из бурых водорослей. С целью исключения влияния особенностей восстанавливающего агента на технологические особенности инкапсуляции в качестве восстановителя применялось традиционное подсолнечное масло.

Альгинат натрия добавлялся в воду в различных пропорциях и перемешивался в течение 2-х минут с помощью верхнеприводной мешалки со скоростью вращения привода не менее 2000 об/мин [72]. В полученную суспензию добавлялся восстанавливающий агент и перемешивался в течение 2-х минут. Полученная эмульсия дели-

лась на капсулы через капельную воронку с выходным отверстием 0,71 см. Деление осуществлялось в водный раствор хлорида кальция, приготовленный заранее в пропорциях  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O} = 1/50$ . После фильтрации и промывки полученные капсулы подвергались сушке в сушильном шкафу при температуре 40 °С в течение 12 часов.

Альгинат натрия отличается невысокой смачиваемостью водой, связанной со склонностью отдельных частиц порошка альгината к интенсивной агрегации в воде с образованием агломератов. Эффективное приготовление суспензии с применением альгината достигается принудительным высокоскоростным перемешиванием, обеспечивающим разрушение агломератов. При интенсивном перемешивании, взаимодействуя с водой, альгинат натрия образует коллоидный раствор.

На следующей стадии приготовления капсул суспензия альгината натрия по каплям добавляется в раствор хлорида кальция, где происходит процесс гелеобразования альгината, который возможен при pH ниже 4. Механизм образования альгинатных гелей включает совместное связывание ионов кальция между расположенными в одну линию лентами макромолекул, которые имеют поры или полости размером 0,19–0,20 нм, соответствующие диаметру иона  $\text{Ca}^{+2}$  [73]. Интенсивное гелеобразование происходит при заполнении пор ионами кальция, обеспечивая поперечное сшивание макромолекул через замещенные катионы натрия  $\text{Na}^+$ . После промывки дистиллированной водой отделенные капли альгинатного геля с эмульгированным восстанавливающим агентом подвергаются сушке. В процессе высушивания происходит испарение избытка влаги из геля с уменьшением объема, провоцирующее разрушение эмульсии внутри отдельной частицы

альгинатного геля с последующим образованием кальций-альгинатной капсулы, содержащей восстанавливающий агент.

Авторами всех рассмотренных работ в качестве восстанавливающего агента применяются омолаживатели в виде органических масел различной молекулярной массы. Однако механизм действия такого восстанавливающего агента в асфальтобетоне сводится лишь к растворению в нем состаренных в процессе эксплуатации компонентов битума и локального снижения хрупкости.

Результатом процесса самозалечивания является восстановление целостности структуры физико-химических связей в композите посредством смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул, обеспечивающего упрочнение [56]. В битуме самозалечивание происходит на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей с образованием новых сшивок и цепей [57, 58] через дитопические и тритопические молекулы [59].

В случае с омолаживателями на основе масла, указанные процессы не протекают, поэтому эффекта сращивания молекул битума не происходит. Происходит лишь частичное разбавление компонентов битума в омолаживателе, способствующее снижению потенциала развития трещины.

Результат технологий инкапсулирования — получение контейнеров, содержащих восстанавливающий агент, которые отличаются как исходными компонентами, так и свойствами получаемых капсул. Основные характеристики таких контейнеров с различной формой отражены в табл. 1.

Получаемые различными методами капсулы могут иметь размеры от 10 мкм до 3 мм, в которых в качестве инкапсулированного восстанавли-

Табл. 1. Основные свойства капсул, содержащих восстанавливающий агент

Table 1. Basic properties of capsules that contain a healing agent

№ No.	Материал капсул Capsule material	Форма Shape	Размер Size	Восстанавливающий агент (ВА) Reducing agent (RA)	Объем ВА, % RA Volume, %	Ссылка Reference
1	Форполимер	Шар Sphere	$d = 100$ мкм / $\mu\text{m}$	Подсолнечное масло Sunflower oil	—	[67, 68]
2	метанол-меламин- формальдегид		$d = 10\text{--}20$ мкм / $\mu\text{m}$	Промышленный реювенатор Industrial rejuvenator	50	[69]
3	Methanol- melamine- formaldehyde pre-polymer		$d = 57,5$ мкм / $\mu\text{m}$	Масло с полярными эпоксидными группами Oil containing polar epoxide groups	80	[71]
4	Сепиолит Sepiolite	Шар / Sphere	—	Промышленный реювенатор Industrial rejuvenator	40	[69]
5	Полимер Polymer	Шар / Sphere	$d = 1\text{--}1,3$ мм / mm		80	[69]

№ No.	Материал капсул Capsule material	Форма Shape	Размер Size	Восстанавливающий агент (ВА) Reducing agent (RA)	Объем ВА, % RA Volume, %	Ссылка Reference
6	Альгинат кальция Calcium alginate	Шар / Sphere	$d = 1,95$ мм / mm	Смесь реюнивателя с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида A mix of the rejuvenator with the olefin-maleic anhydride polymer solution	56	[74]
7		Шар / Sphere	$d = 2,9$ мм / mm	Подсолнечное масло Sunflower oil	48	[72]
8		Шар / Sphere			46	[75]
9		Шар / Sphere	$d = 1,95-2,45$ мм mm		90	[78]
10		Шар / Sphere	$d = 2,5$ мм / mm		94	[79]
11		Волокно Fiber	$d = 0,5$ мм / mm $l = 1,5$ мм / mm		70	[76, 77]
12		Эллипсоид Ellipsoid	$d = 0,98-1,74$ мм mm		60	[78]

Примечание:  $d$  — диаметр;  $l$  — длина.

Note:  $d$  — diameter;  $l$  — length.

вающего агента используются преимущественно растительные масла подсолнечника [67, 68, 71–79]. Альтернативный вариант восстанавливающего агента — промышленный восстановитель (rejuvenator), представляющий смесь низкомолекулярных соединений и масел [69–71, 74].

Как правило, капсулы имеют шаровидную или эллипсоидную форму, что облегчает их использование в процесс смешивания с другими компонентами асфальтобетонной смеси. Технология, в которой носителями восстанавливающего агента являются волокна фибры, обладает существенным недостатком: преждевременным разрушением в процессе смешивания и в процессе эксплуатации.

Наибольшее содержание восстанавливающего агента в капсулах достигается в оболочках из альгината кальция, что объясняется простотой технологии приготовления и широким диапазоном варьируемых дозировок компонентов.

Получаемые с помощью различных технологий капсулы отличаются как размерами, так и физико-механическими свойствами, которые должны удовлетворять требованиям по прочности, обеспечивающей их целостность во время приготовления асфальтобетонной смеси и ее уплотнения.

Качество технологии самовосстановления складывается из технологических свойств капсул и восстанавливающих свойств инкапсулированного агента. В настоящий момент не существует единой методологии контроля способности материала к самовосстановлению. Это обусловлено отсутствием

критериев, характеризующих способность материала контролируемым образом самостоятельно реагировать на условия и предпринимать меры по ликвидации неблагоприятного эффекта для свойств или структуры материала.

В работе [80] предложены критерии качества, отражающие эффективность материала с самовосстанавливающей способностью: степень восстановления состояния структуры; скорость восстановления состояния структуры; долговечность восстановленной структуры и своевременность иницирования восстанавливающего процесса. Однако для выбора показателей свойств, которые характеризовали бы каждый из критериев качества, необходимо проведение большего количества эмпирических исследований.

Исследуемые авторами [74, 75, 77, 82–85] показатели качества, отражающие самовосстанавливающую способность асфальтобетонов, приведены в табл. 2.

Анализ представленных работ показывает, что все предложенные методы оценки самовосстанавливающей способности материалов сводятся к расчету коэффициента относительного изменения измеряемого показателя:

$$HL = \frac{X_h}{X_0},$$

где  $X_0$  и  $X_h$  — показатель свойств материала до и после самовосстановления, соответственно.

Данный коэффициент, в соответствии с [80], может быть отнесен к категории показателей, отра-

жающих критерий степени восстановления структуры, что является недостаточным для объективной оценки технологических решений.

При этом только в работе [84] в качестве показателя для оценки самовосстанавливающего эффекта материала используются значения усталостной долговечности, которая в большей степени отражает динамическую схему нагружения в дорожной конструкции. В других случаях [74, 75, 77, 81–83, 85] авторами определяются показатели свойств, характеризующие эксплуатационное состояние материала в момент отказа, когда дефектность структуры является предельной, — структура разрушена. Однако в дорожной конструкции инициирование самовосстанавливающего процесса в материале должно происходить на стадии, предшествующей разрушению структуры.

Отсутствие единой системы оценки не позволяет объективно сравнивать эффективность раз-

личных технологических решений по производству микрокапсул с восстанавливающим агентом, а также производить оценку влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на процесс самовосстановления и его результат.

Таким образом, в дальнейших работах необходимо усовершенствовать не только технологические аспекты, позволяющие получать капсулы с максимальным содержанием восстанавливающего агента, но и разрабатывать методики оценки эффективности разрабатываемых решений, отражающих степень изменения дефектности структуры и скорость ее изменения во время восстановления, и кинетику образования дефектов в структуре после процесса самозалечивания. Стоит отметить, что установление количественного показателя, отражающего уровень дефектности, при котором инициирование самовосстановления позволяет достичь максимальной эффективности, является одной

**Табл. 2.** Показатели качества, отражающие самовосстанавливающую способность асфальтобетонов

**Table 2.** Quality indicators demonstrating self-healing properties of asphalt concretes

№ No.	Показатель Parameter	Условия восстановления Self-healing conditions		Эффект, % Effect, %	Восстанавливающий агент Reducing agent	Ссылка Reference
		Время, ч Time, h	Температура, °C Temperature, °C			
1	Трещиностойкость Crack resistance	20	23±2	14–19	Реюниватор Modiseal R20 Rejuvenator Modiseal R20	[83]
2		20	20±2	—	Смесь реюниватора с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида Rejuvenator mix with the solution of olefin-maleic anhydride polymer	[84]
3	Усталостная долговечность Fatigue life	20	20±2	—		[84]
4	Прочность при 3-точечном изгибе 3-point bending strength	4	20±2	73–90		Реюниватор Modiseal R20 Rejuvenator Modiseal R20
5		3	20±2	50	[77]	
6		3	20±2	24	Отработанное подсолнечное масло Waste sunflower oil	[77]
7		6–192	20±2	53	Подсолнечное масло Sunflower oil	[75]
8		3	20±2	30		[77]
9		6–216	20±2	54–95		[81]
10	5–216	20±2	20–55	[82]		
11	Растяжимость Tensility	4	20...22	15–90	Наночастицы Nanoparticles	[58]
12	Жесткость Rigidity	0,5–1,5	20...22	80–100		[81]
13	Прочность при разрыве Rupture resistance	6–48	20...22	80		[58]
14	Прочность при изгибе Bending strength	72	30±2	50–89	Реюниватор Rejuvenator	[85]

из ключевых задач в области технологии самовосстановления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация технологии самовосстановления асфальтобетона возможна за счет использования различного рода инкапсулированных модификаторов, которые могут способствовать восстановлению благодаря интенсификации собственного потенциала вяжущего к восстановлению путем омолаживающего воздействия или за счет создания новых адгезионных связей в процессе преобразования восстанавливающего агента.

Процесс формирования новых адгезионных связей можно разделить на два этапа: транспортный и структурообразующий. На первом этапе происходит перемещение рассматриваемого модификатора, выступающего в качестве адгезива, диффузия внутрь матрицы, которая является субстратом, и ориентация молекул в определенном порядке в граничном слое. На втором этапе под действием химических или сил Ван-дер-Ваальса происходит взаимодействие адгезива и субстрата. При этом расстоянии между молекулами, не превышающем 0,5 нм, действуют ковалентные связи, на расстоянии от 1 до 100 нм проявляется действие силы ионных связей и сил Ван-дер-Ваальса [86].

Для объяснения механизмов формирования и разрушения адгезионных связей существует несколько подходов, которые выражаются в отдельных теориях адгезии и направлены на обоснование влияния различных факторов на адгезионную прочность соединения «адгезив-субстрат».

Наиболее простой механизм сцепления описывается в механической теории адгезии [87], согласно которой связи образуются за счет проникновения адгезива в неровности, трещины, дефекты, шероховатости субстрата, где после затвердевания формируется большая площадь трения и зоны заклинивания, которые препятствуют отделению двух материалов. Прочность такого сцепления зависит от свойств поверхности, пористости субстрата и прочности прослойки адгезива.

В соответствии с адсорбционной (молекулярной) теорией адгезии [88] прочность адгезионного соединения объясняется действием межмолекулярных сил взаимодействия адгезива и субстрата за счет образования связей между полярными функциональными группами. Возникающие в результате такого взаимодействия связи обладают невысокой прочностью и могут быть нарушены изменением температуры.

Образование адгезионных связей за счет химического взаимодействия адгезива и субстрата рассматривается в химической теории адгезии [86], согласно которой функциональные группы молекул адгезива после адсорбции на поверхности субстра-

та соединяются с ней ковалентными или ионными связями, образуя прочное сцепление. Для формирования прочной связи поверхности адгезива с поверхностью субстрата с помощью химических связей необходимо наличие реакционноспособных функциональных групп. По такому принципу происходит образование ковалентных связей при взаимодействии реакционноспособных изоцианатов и поверхности полимера с гидроксильными или аминными группами [89]. Разрушение химических адгезионных связей возможно механическим способом только в том случае, когда их прочность выше когезионных связей адгезива или субстрата.

Возникающая также между полимерами адгезионная связь может быть объяснена диффузной теорией адгезии [90], согласно которой молекулы одного полимера способны диффундировать внутрь другого на глубину более 10 мкм, растворяясь с формированием связей без видимой границы раздела. Реализация такого механизма адгезионного сцепления возможна при выполнении термодинамического и кинетического условий, которые обеспечивают совместимость субстрата и адгезива и необходимую подвижность их макромолекул, соответственно.

В соответствии с теорией слабых граничных слоев [91] при взаимодействии адгезива и субстрата образуется граничный слой, обладающий свойствами, отличными от свойств адгезива и субстрата, что способно вносить значительные изменения в интерпретации механизма формирования и разрушения адгезионных связей.

В релаксационной теории адгезии [92] рассматривается влияние процессов возникновения внутренних напряжений и деформаций на прочность адгезии, которая выражается в изменении числа связей, обеспечивающих сцепление. Также существует электрическая теория [93], согласно которой сцепление осуществляется при электризации контакта адгезива и субстрата, вследствие возникновения разности потенциалов, которая к органическим композитам не может быть применима.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о росте интереса со стороны ученых к исследованиям в области технологии самовосстанавливающихся материалов, а также определенных успехах, достигнутых в этом направлении, в том числе в России.

К самовосстанавливающимся стоит относить те материалы, которые обладают способностью без дополнительных энергетических ресурсов самостоятельно инициировать процессы восстановления состояния структуры, скорость которых превышает скорость образования дефектов. Существующие технические решения позволяют получать капсулы, содержащие восстанавливающий агент до 90–94 % от общего объема.

Необходимо формулирование общих требований и показателей качества самовосстанавливаю-

щихся материалов для строительства, характеризующих степень их эффективности в зависимости от условий применения.

Положения теории адгезии могут быть использованы при реализации технологии самовосстанов-

ления, принцип действия которой заключается в ликвидации влияния дефектов, образующихся в процессе эксплуатации, достичь которую возможно за счет воссоздания механизмов образования адгезионных связей с помощью инкапсулированного модификатора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Bengisu M., Ferrara M.* Designing with kinetic materials // SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 2018. Pp. 65–80. DOI: 10.1007/978-3-319-76889-2\_5
2. *Shahinpoor M., Schneider H.-J.* Intelligent materials. Royal Society of Chemistry, 2007. DOI: 10.1039/9781847558008
3. *Ghosh S.K.* Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications // Self-Healing Materials. Weinheim : Wiley, 2009. Pp. 1–28. DOI: 10.1002/9783527625376.ch1
4. *Griffith A.A.* The phenomenon of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1920. Vol. 221. Issue 582–593. Pp. 163–198. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006.
5. *Королев Е.В., Баженов Ю.М., Альбакасов А.И.* Радиационно-защитные и химически стойкие серые строительные материалы. Оренбург : ОГУ, 2010. 364 с.
6. *Schlangen E., Sangadji S.* Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms — recent advances in self healing concrete and asphalt // Procedia Engineering. 2013. Vol. 54. Pp. 39–57. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.005
7. *Zhuang X., Zhou S.* The prediction of self-healing capacity of bacteria-based concrete using machine learning approaches // Computers, Materials & Continua. 2019. Vol. 59. Issue 1. Pp. 57–77. DOI: 10.32604/cmc.2019.04589
8. *Wiktoria V., Jonkers H.M.* Bacteria-based concrete: From concept to market // Smart Materials and Structures. 2016. Vol. 25. Issue 8. P. 084006. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084006
9. *De Belie N., Wang J.* Bacteria-based repair and self-healing of concrete // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2016. Vol. 5. Issue 1–2. Pp. 35–56. DOI: 10.1080/21650373.2015.1077754
10. *Nallanathel M., Needhidasan S., Ananya M.* Self healing concrete — Facts and potentials // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 33. Pp. 24243–24246.
11. *Li W., Dong B., Yang Z., Xu J., Chen Q., Li H. et al.* Recent advances in intrinsic self-healing cementitious materials // Advanced Materials. 2018. Vol. 30. Issue 17. P. 1705679. DOI: 10.1002/adma.201705679
12. *Breugel K.* Self healing concepts in civil engineering for sustainable solutions: Potential and constraints // Proceedings of the Second International Conference on Self-healing Materials. Chicago, 2009. URL: <http://selfhealingconcrete.blogspot.com/p/literature-more.html>
13. *Inozemtcev S.S., Korolev E.V.* Interaction process on the phases interface “bitumen — dispersed phase from cement stone” // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 82. Issue 6. Pp. 60–67. DOI: 10.18720/MCE.82.6
14. *Jonkers H.M.* Self healing concrete: A biological approach. Springer Series in Materials Science, 2007. Pp. 195–204. DOI: 10.1007/978-1-4020-6250-6\_9
15. *Jonkers H.M., Schlange E.* Development of a bacteria-based self healing concrete // Tailor made concrete structures. CRC Press, 2008. P. 109. DOI: 10.1201/9781439828410.ch72
16. *Jonkers H.M., Schlangen E.* Bacteria-based self-healing concrete // International Journal of Restoration of Buildings and Monuments. 2009. Vol. 15. Issue 4. Pp. 255–265.
17. *Jonkers H.M., Thijssen A., Muijzer G., Copuroglu O., Schlangen E.* Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete // Ecological Engineering. 2010. Vol. 36. Issue 2. Pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
18. *Zemskov S., Jonkers H.M., Vermolen F.J.* An analytical model for the probability characteristics of a crack hitting an encapsulated self-healing agent in concrete // Computer Algebra in Scientific Computing. 2010. Pp. 280–292. DOI: 10.1007/978-3-642-15274-0\_25
19. *Jonkers H.M., Loosdrecht M.* BioGeoCivil Engineering // Ecological Engineering. 2010. Vol. 36. Issue 2. Pp. 97–98. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.09.011
20. *Zemskov S.V., Jonkers H.M., Vermolen F.J.* Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials // Computational Materials Science. 2011. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.06.024
21. *Srinivasa Reddy V., Seshagiri Rao M.V., Sushma S.* Feasibility study on bacterial concrete as an innovative self crack healing system // International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. 2015. Vol. 2. Issue 7. Pp. 642–647.

22. Bansal S., Tamang R.K., Bansal P., Bhurtel P. Biological methods to achieve self-healing in concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020. Pp. 63–71. DOI: 10.1007/978-981-13-7615-3\_5
23. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus subtilis bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016. Vol. 3. Issue 5. Pp. 1229–1234.
24. Sarkar B.C., Sarkar M. Genetically modified Bacillus subtilis bacterial strain for self-healing and sustainable green bio-concrete // *Green Chemistry*. 2015. Vol. 5. Issue 3. P. 4172.
25. Depaa R.A.B., Felix Kala T. Experimental investigation of self healing behavior of concrete using silica fume and GGBFS as mineral admixtures // *Indian Journal of Science and Technology*. 2015. Vol. 8. Issue 36. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i36/87644
26. Sakina Najmuddin Saifee, Divya Maheshbhai Lad, Jayesh Rameshbhai Juremalani. Critical appraisal on bacterial Concrete // *IJRDO-Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 10–14.
27. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. Issue 2. Pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
28. Wang J., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. Pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
29. Feng X. Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules // *International Conference on Durability of Concrete Structures*. 2008. Pp. 195–204.
30. Mihashi H., Kaneko Y., Nishiwaki T., Otsuka K. Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength // *Concrete Research and Technology*. 2000. Vol. 11. Issue 2. Pp. 21–28. DOI: 10.3151/crt1990.11.2\_21
31. Van Tittelboom K., Wang J., Araújo M., Snoeck D., Gruyaert E., Debbaut B. et al. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 107. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.186.
32. Thao T.D.P., Johnson T.J.S., Tong Q.S., Dai P.S. Implementation of self-healing in concrete — Proof of concept // *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. 2009. Vol. 2. Issue 2. Pp. 116–125. DOI: 10.1080/19373260902843506
33. Han S., Choi E.K., Park W., Yi C., Chung N. Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete // *Applied Biological Chemistry*. 2019. Vol. 62. Issue 1. DOI: 10.1186/s13765-019-0426-4
34. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 3 (89). С. 22–26.
35. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the weathering resistance of asphalt by nanomodification // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp. 147–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.147
36. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов // *Вестник МГСУ*. 2015. № 3. С. 29–39. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.3.29-39
37. Высоцкая М.А., Власова Е.А., Кузнецов Д.А., Курлыкина А.В., Шеховцова С.Ю. Обзор состояния сегмента пропиточных материалов для покрытий автомобильных дорог // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8. С. 6–12. DOI: 10.12737/article\_5b6d584031cc8.02258080
38. Меркулов В.В., Ибатов М.К., Измаилова Г.Г., Жаксыбаева Г.Ш., Мантлер С.Н. Применение модифицированной коксохимической смолы для обработки асфальтобетонных дорожных покрытий // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 10–2. С. 267–270.
39. Муса С.С., Рудакова В.В. Перспективы применения дорожных битумных эмульсий // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2015. № 3 (5). 2015. С. 4.
40. Беляев Н.Н., Паневин Н.И. Новая роль пропиток // *Автомобильные дороги*. 2016. № 11. С. 82–86.
41. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Обзор современного опыта использования реюнивателей для реверсинга асфальтобетонных покрытий // *Региональная архитектура и строительство*. 2018. № 3 (36). С. 5–16.
42. Brownbridge J. The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: use and need for asphalt rejuvenation // *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation*. Newport Beach CA, USA, 2010. Pp. 351–364.
43. Zaumanis M., Mallick R.B., Poulikakos L., Frank R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 71. Pp. 538–550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073
44. Cong P., Wang J., Li K., Chen S. Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents // *Fuel*. 2012. Vol. 97. Pp. 678–684. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.028
45. Bergendahl J. Environmental effects of coal tar-based pavement rejuvenators. 2017. 76 p.
46. Zhang Y., van de Ven M.F.C., Moleenaar A.A.A., Wu S.P. Assessment of effectiveness of rejuvenator on artificially aged porous asphalt concrete //

- Construction and Building Materials. 2016. Vol. 110. Pp. 286–292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.042
47. *Mazzoni G., Bocci E., Canestrari F.* Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp. 157–168. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.01.001
48. *Xu G., Wang H., Sun W.* Molecular dynamics study of rejuvenator effect on RAP binder: Diffusion behavior and molecular structure // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 158. Pp. 1046–1054. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.192
49. *Moghaddam T.B., Baaj H.* The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 114. Pp. 805–816.
50. *Ongel A., Hugener M.* Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 467–474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.030
51. *Yu X.K., Zaumanisa M., Santos S.D., Poulikakos L.D.* Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders // *Fuel*. 2014. Vol. 135. Pp. 162–171. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.038
52. *Shen J., Amirkhani S., Miller J.A.* Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007. Vol. 19. Issue 5. Pp. 376–384. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:5(376)
53. *Bhasin A., Palvadi S., Little D.* Influence of aging and temperature on intrinsic healing of asphalt binders // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011. Vol. 2207. Issue 1. Pp. 70–78. DOI: 10.3141/2207-10
54. *Tang J., Liu Q., Wu Sh., Ye Q., Sun Y., Schlanguen E.* Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113. Pp. 1029–1033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145
55. *Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R.* A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 771–779. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.021
56. *Tabaković A., Schlanguen E.* Self-healing technology for asphalt pavements // *Self-healing Materials*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. Pp. 285–306. DOI: 10.1007/12\_2015\_335
57. *Fischer H.* Self-repairing material systems — a dream or a reality? // *Natural Science*. 2010. Vol. 2. Issue 8. Pp. 873–901. DOI: 10.4236/ns.2010.28110
58. *Qiu J., van de Ven M.F.C., Wu S., Yu J., Molenaar A.A.A.* Investigating the self healing capability of bituminous binders // *Road Materials and Pavement Design*. 2009. Vol. 10. Issue sup1. Pp. 81–94. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690237
59. *Phillips M.C.* Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing. Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, 1998. No. 115.
60. *Cordier P., Tournilhac F., Soulié-Ziakovic C., Leibler L.* Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly // *Nature*. 2008. Vol. 451. Pp. 977–980. DOI: 10.1038/nature06669
61. *Liu Q., Schlanguen E., van de Ven M., García A.* Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Issue 7. Pp. 1207–1213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019
62. *Liu Q., Schlanguen E., García A., van de Ven M.* Healing of porous asphalt concrete via induction heating // *Road Materials and Pavement Design*. 2010. Vol. 11. Issue sup1. Pp. 527–542. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690345
63. *Liu Q., Schlanguen E., van de Ven M.* Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. Issue 7. Pp. 880–885. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000677
64. *Xu Sh., García A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlanguen E.* Self-healing asphalt review: from idea to practice // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5. Issue 17. P. 1800536. DOI: 10.1002/admi.201800536
65. *García A.* Self-healing of open cracks in asphalt mastic // *Fuel*. 2012. Vol. 93. Pp. 264–272. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.009
66. *Sarsam S., Barakhas S.A.* Influence of load repetitions and heating on micro crack healing of asphalt stabilized subgrade soil // *International Journal Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 399–405.
67. *Su J.F., Schlanguen E., Qiu J.* Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt // *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. Pp. 563–571. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.11.013
68. *Su J.F., Wang Y.Y., Han N.X., Yang P., Han S.* Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator // *Construction and Building Material*. 2016. Vol. 106. Pp. 317–329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120
69. *Barrasa R.C., López V.B., Montoliu C.M.-P., Ibáñez V.C., Pedrajas J., Santarén J.* Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 162. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.199
70. *Su J.F., Schlanguen E.* Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt // *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 198–199. Pp. 289–300. DOI: 10.1016/j.cej.2012.05.094

71. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 135. Pp. 641–649. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165
72. Al-Mansoori T., Micaeloab R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 1091–1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137
73. Корячкина С.Я., Пригарина О.М. Научные основы производства продуктов питания: уч. пос. Орел : Госуниверситет УНПК, 2011. 376 с.
74. Xu S., Tabaković A., Liua X., Schlangen E. Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 169. Pp. 379–387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.046
75. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. Issue 2. DOI: 10.1617/s11527-018-1172-5
76. Prajer M., Wu X., Garcia S.J., van der Zwaag S. Direct and indirect observation of multiple local healing events in successively loaded fibre reinforced polymer model composites using healing agent-filled compartmented fibres // *Composites Science and Technology*. 2015. Vol. 106. Pp. 127–133. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.11.013
77. Tabakovic A., Dirk B., van Gerwen M., Copuroglu O., Post W., Garcia S.J. et al. The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2017. Vol. 4. Issue 4. Pp. 347–359. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.01.004
78. Xu S., Tabakovic A., Liu X., Palin D., Schlangen E. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 3. P. 468. DOI: 10.3390/app9030468
79. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 01008. DOI: 10.1051/mateconf/201825101008
80. Inozemtcev S., Korolev E. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702007
81. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Micaelo R., Garcia A. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 161. Pp. 330–339. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.125
82. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures // *Materials and Structures*. 2019. Vol. 52. Issue 4. DOI: 10.1617/s11527-019-1376-3
83. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete // *Materials*. 2019. Vol. 12. Issue 1. P. 168. DOI: 10.3390/ma12010168
84. Tabaković A., Schuyffel L., Karač A., Schlangen E. An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. Issue 7. P. 647. DOI: 10.3390/app7070647
85. Shu B., Bao S., Wu S., Dong L., Li C., Yang X. et al. Synthesis and effect of encapsulating rejuvenator fiber on the performance of asphalt mixture // *Materials*. 2019. Vol. 12. Issue 8. P. 1266. DOI: 10.3390/ma12081266
86. Евдокимов Ю.М. Адгезия. От макро- и микроуровня к наносистемам. М. : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2011. 208 с.
87. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М. : Химия, 1974. 391 с.
88. Дебройн Н., Гувинк Р. Адгезия, клеи, цементы, припой. М. : Изд-во иностр. лит., 1954. 584 с.
89. Laurila T., Vuorinen V., Mattila T.T., Turunen M., Paulasto-Kröckel M., Kivilahti J.K. Interfacial adhesion in polymer systems // *Interfacial Compatibility in Microelectronics. Microsystems*. London : Springer, 2012. Pp. 101–133. DOI: 10.1007/978-1-4471-2470-2\_5
90. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. М. : Ростехиздат, 1960. 244 с.
91. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров // *Успехи химии*. 1972. Т. 41. № 8. С. 1431–1464.
92. Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. М. : Лесная промышленность, 1964. 248 с.
93. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М. : Наука, 1973. 279 с.

Поступила в редакцию 27 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Сергеевич Иноземцев** — кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 623809, Scopus: 56433487700, ResearcherID: D-1295-2016, ORCID: 0000-0002-2965-0846; inozemtsevss@mail.ru;

**До Тоан Чонг** — аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; trongtoan007@gmail.com.

## REFERENCES

1. Bengisu M., Ferrara M. Designing with kinetic materials. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. 2018; 65-80. DOI: 10.1007/978-3-319-76889-2\_5
2. Shahinpoor M., Schneider H.-J. *Intelligent Materials*. Royal Society of Chemistry, 2007. DOI: 10.1039/9781847558008
3. Ghosh S.K. Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications. *Self-Healing Materials*. Weinheim, Wiley, 2009; 1-28. DOI: 10.1002/9783527625376.ch1
4. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1920; 221(582-593):163-198. DOI: doi.org/10.1098/rsta.1921.0006
5. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Al'bakasov A.I. *Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials*. Orenburg, Orenburg State University, 2010; 364. (rus.).
6. Schlangen E., Sangadji S. Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms — recent advances in self healing concrete and asphalt. *Procedia Engineering*. 2013; 54:39-57. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.005
7. Zhuang X., Zhou S. The prediction of self-healing capacity of bacteria-based concrete using machine learning approaches. *Computers, Materials & Continua*. 2019; 59(1):57-77. DOI: 10.32604/cmc.2019.04589
8. Wiktor V., Jonkers H.M. Bacteria-based concrete: From concept to market. *Smart Materials and Structures*. 2016; 25(8):084006. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084006
9. De Belie N., Wang J. Bacteria-based repair and self-healing of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2016; 5(1-2):35-56. DOI: 10.1080/21650373.2015.1077754
10. Nallanathel M., Needhidasan S., Ananya M. Self healing concrete — Facts and potentials. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(33):24243-24246.
11. Li W., Dong B., Yang Z., Xu J., Chen Q., Li H. et al. Recent advances in intrinsic self-healing cementitious materials. *Advanced Materials*. 2018; 30(17):1705679. DOI: 10.1002/adma.201705679
12. Breugel K. Self healing concepts in civil engineering for sustainable solutions: Potential and constraints. *Proceedings of the Second International Conference on Self-healing Materials*. Chicago, 2009. URL: <http://selfhealingconcrete.blogspot.com/p/literature-more.html>
13. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Interaction process on the phases interface “bitumen – dispersed phase from cement stone”. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 82(6):60-67. DOI: 10.18720/MCE.82.6
14. Jonkers H.M. *Self Healing Concrete: A Biological Approach*. Springer Series in Materials Science, 2007; 195-204. DOI: 10.1007/978-1-4020-6250-6\_9
15. Jonkers H.M., Schlangen E. Development of a bacteria-based self healing concrete. *Tailor made concrete structures*. CRC Press, 2008; 109. DOI: 10.1201/9781439828410.ch72
16. Jonkers H.M., Schlangen E. Bacteria-based self-healing concrete. *International Journal of Restoration of Buildings and Monuments*. 2009; 15(4):255-265.
17. Jonkers H.M., Thijssen A., Muijzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010; 36(2):230-235. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
18. Zemskov S., Jonkers H.M., Vermolen F.J. An analytical model for the probability characteristics of a crack hitting an encapsulated self-healing agent in concrete. *Computer Algebra in Scientific Computing*. 2010; 280-292. DOI: 10.1007/978-3-642-15274-0\_25
19. Jonkers H.M., Loosdrecht M. BioGeoCivil Engineering. *Ecological Engineering*. 2010; 36(2):97-98. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.09.011
20. Zemskov S.V., Jonkers H.M., Vermolen F.J. Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials. *Computational Materials Science*. 2011. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.06.024
21. Srinivasa Reddy V., Seshagiri Rao M.V., Sushma S. Feasibility study on bacterial concrete as an innovative self crack healing system. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. 2015; 2(7):642-647.
22. Bansal S., Tamang R.K., Bansal P., Bhurtel P. *Biological Methods to Achieve Self-healing in Concrete*. Lecture Notes in Civil Engineering, 2020; 63-71. DOI: 10.1007/978-981-13-7615-3\_5

23. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus Subtilis bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016; 3(5):1229-1234.
24. Sarkar B.C., Sarkar M. Genetically modified Bacillus subtilis bacterial strain for self-healing and sustainable green bio-concrete. *Green Chemistry*. 2015; 5(3):4172.
25. Depaa R.A.B., Felix Kala T. Experimental investigation of self healing behavior of concrete using silica fume and GGBFS as mineral admixtures. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015; 8(36). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i36/87644
26. Sakina Najmuddin Saifee, Divya Maheshbhai Lad, Jayesh Rameshbhai Juremalani. Critical appraisal on bacterial concrete. *IJRDO-Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015; 1(3):10-14.
27. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010; 36(2):230-235. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
28. Wang J., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 68:110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
29. Feng X. Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules. *International Conference on Durability of Concrete Structures*. 2008; 195-204.
30. Mihashi H., Kaneko Y., Nishiwaki T., Otsuka K. Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength. *Concrete Research and Technology*. 2000; 11(2):21-28. DOI: 10.3151/crt1990.11.2\_21
31. Van Tittelboom K., Wang J., Araújo M., Snoeck D., Gruyaert E., Debbaut B. et al. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. *Construction and Building Materials*. 2016; 107:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.186
32. Thao T.D.P., Johnson T.J.S., Tong Q.S., Dai P.S. Implementation of self-healing in concrete — Proof of concept. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. 2009; 2(2):116-125. DOI: 10.1080/19373260902843506
33. Han S., Choi E.K., Park W., Yi C., Chung N. Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete. *Applied Biological Chemistry*. 2019; 62(1). DOI: 10.1186/s13765-019-0426-4
34. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Aggressivity of operational conditions of road-climatic zones of Russia. *Science and Engineering for Highways*. 2019; 3(89):22-26. (rus.).
35. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the weathering resistance of asphalt by nanomodification. *Materials Science Forum*. 2019; 945:147-157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.147
36. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Operational properties of nanomodified stone mastic asphalt. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 3:29-39. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.3.29-39 (rus.).
37. Vysotskaya M.A., Vlasova E.A., Kuznetsov D.A., Kurlykina A.V., Shekhovtsova S.Yu. Overview of the condition of the segment of impregnating materials for road coatings. *Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2018; 8:6-12. DOI: 10.12737/article\_5b6d5840311cc8.02258080 (rus.).
38. Merkulov V.V., Ibatov M.K., Izmailova G.G., Zhaksybaeva G.Sh., Mantler S.N. An application of the modified coke-chemical tar to processing of asphalt road pavements. *Modern High Technologies*. 2016; 10-2. 267-270. (rus.).
39. Musa S.S., Rudakova V.V. The prospects of application of road bitumen emulsion. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2015; 3(5):17-26. (rus.).
40. Belyaev N.N., Panevin N.I. The new role of impregnation. *Car Roads*. 2016; 11:82-86. (rus.).
41. Shekhovtsova S.Yu., Korolev E.V. Review of current experience with the use of reunitors for the reversal of asphalt concrete coatings. *Regional Architecture and Construction*. 2018; 3(36):5-16. (rus.).
42. Brownbridge J. The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: Use and need for asphalt rejuvenation. *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation*. Newport Beach CA, USA, 2010; 351-364.
43. Zaumanis M., Mallick R.B., Poulidakos L., Frank R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2014; 71:538-550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073
44. Cong P., Wang J., Li K., Chen S. Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents. *Fuel*. 2012; 97:678-684. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.028
45. Bergendahl J. *Environmental Effects of Coal Tar-Based Pavement Rejuvenators*. 2017; 76.
46. Zhang Y., van de Ven M.F.C., Moleenaar A.A.A., Wu S.P. Assessment of effectiveness of rejuvenator on artificially aged porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 110:286-292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.042
47. Mazzoni G., Bocci E., Canestrari F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2018; 5(3):157-168. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.01.001
48. Xu G., Wang H., Sun W. Molecular dynamics study of rejuvenator effect on RAP binder: Diffusion

- behavior and molecular structure. *Construction and Building Materials*. 2018; 158:1046-1054. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.192
49. Moghaddam T.B., Baaj H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review. *Construction and Building Materials*. 2016; 114:805-816.
50. Ongel A., Hugener M. Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*. 2015; 94:467-474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.030
51. Yu X.K., Zaumanisa M., Santos S.D., Poulikakos L.D. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*. 2014; 135:162-171. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.038
52. Shen J., Amirhanian S., Miller J.A. Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 19(5):376-384. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:5(376)
53. Bhasin A., Palvadi S., Little D. Influence of aging and temperature on intrinsic healing of asphalt binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2207(1):70-78. DOI: 10.3141/2207-10
54. Tang J., Liu Q., Wu Sh., Ye Q., Sun Y., Schlangenc E. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2016; 113:1029-1033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145
55. Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R. A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2017; 154:771-779. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.021
56. Tabaković A., Schlangen E. Self-healing technology for asphalt pavements. *Self-healing Materials*. Springer Berlin Heidelberg, 2015; 285-306. DOI: 10.1007/12\_2015\_335
57. Fischer H. Self-repairing material systems — a dream or a reality? *Natural Science*. 2010; 2(8): 873-901. DOI: 10.4236/ns.2010.28110
58. Qiu J., van de Ven M.F.C., Wu S., Yu J., Molenaar A.A.A. Investigating the self healing capability of bituminous binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2009; 10(sup1):81-94. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690237
59. Phillips M.C. *Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing*. Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, 1998; 115.
60. Cordier P., Tournilhac F., Soulié-Ziakovic C., Leibler L. Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. *Nature*. 2008; 451:977-980. DOI: 10.1038/nature06669
61. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M., García A. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2010; 24(7):1207-1213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019
62. Liu Q., Schlangen E., García Á., van de Ven M. Healing of porous asphalt concrete via induction heating. *Road Materials and Pavement Design*. 2010; 11(sup1):527-542. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690345
63. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M. Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013; 25(7):880-885. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000677
64. Xu Sh., García A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E. Self-healing asphalt review: From idea to practice. *Advanced Materials Interfaces*. 2018; 5(17):1800536. DOI: 10.1002/admi.201800536
65. Garcia A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*. 2012; 93:264-272. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.009
66. Sarsam S., Barakhas S.A. Influence of load repetitions and heating on micro crack healing of asphalt stabilized subgrade soil. *International Journal Materials Chemistry and Physics*. 2015; 1(3):399-405.
67. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder Technology*. 2013; 235:563-571. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.11.013
68. Su J.F., Wang Y.Y., Han N.X., Yang P., Han S. Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Material*. 2016; 106:317-329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120
69. Barrasa R.C., López V.B., Montoliu C.M.-P., Ibáñez V.C., Pedrajas J., Santarén J. Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014; 162:188-197. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.199
70. Su J.F., Schlangen E. Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*. 2012; 198-199:289-300. DOI: 10.1016/j.cej.2012.05.094
71. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2017; 135:641-649. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165
72. Al-Mansoori T., Micaeloab R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017; 155:1091-1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137
73. Koryachkina S.Ya., Prigarina O.M. *Scientific foundations of food production: a tutorial*. Oryol, State University of UPPK, 2011; 376. (rus.).

74. Xu S., Tabaković A., Liua X., Schlangen E. Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. *Construction and Building Materials*. 2018; 169:379-387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.046
75. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2018; 51(2). DOI: 10.1617/s11527-018-1172-5
76. Prajer M., Wu X., Garcia S.J., van der Zwaag S. Direct and indirect observation of multiple local healing events in successively loaded fibre reinforced polymer model composites using healing agent-filled compartmented fibres. *Composites Science and Technology*. 2015; 106:127-133. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.11.013
77. Tabakovic A., Dirk B., van Gerwen M., Copuroglu O., Post W., Garcia S.J. et al. The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2017; 4(4):347-359. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.01.004
78. Xu S., Tabakovic A., Liu X., Palin D., Schlangen E. Optimization of the Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt. *Applied Sciences*. 2019; 9(3):468. DOI: 10.3390/app9030468
79. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:01008. DOI: 10.1051/matec-conf/201825101008
80. Inozemtcev S., Korolev E. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:02007. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199702007
81. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Micaelo R., Garcia A. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*. 2018; 161:330-339. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.125
82. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2019; 52(4). DOI: 10.1617/s11527-019-1376-3
83. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete. *Materials*. 2019; 12(1):168. DOI: 10.3390/ma12010168
84. Tabaković A., Schuyffel L., Karač A., Schlangen E. An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. *Applied Sciences*. 2017; 7(7):647. DOI: 10.3390/app7070647
85. Shu B., Bao S., Wu S., Dong L., Li C., Yang X. et al. Synthesis and effect of encapsulating rejuvenator fiber on the performance of asphalt mixture. *Materials*. 2019; 12(8):1266. DOI: 10.3390/ma12081266
86. Evdokimov Yu.M. *Adhesion. From macro and micro to nanosystems*. Moscow, Publishing house of the Moscow state. University of forests, 2011; 208. (rus.).
87. Berlin A.A., Basin V.E. *Basics of polymer adhesion*. Moscow, Khimiya, 1969; 320. (rus.).
88. Debroyn N., Guvink R. *Adhesion, Glues, cements, solders*. Moscow, Publishing house of foreign lit, 1954; 600. (rus.).
89. Laurila T., Vuorinen V., Mattila T.T., Turunen M., Paulasto-Kröckel M., Kivilahti J.K. Interfacial adhesion in polymer systems. *Interfacial Compatibility in Microelectronics. Microsystems*. Springer, London, 2012; 101-133. DOI: 10.1007/978-1-4471-2470-2\_5
90. Voyutskiy S.S. *Autohesion and adhesion of high polymers*. Moscow, Rostekhzizdat, 1960; 244. (rus.).
91. Bikerman Ya.O. New ideas concerning the strength of adhesive joints of polymers. *Uspekhi Khimii*. 1972; 41(8):1431-1464. (rus.).
92. Moskvitin N.I. *Physicochemical fundamentals of gluing and sticking processes*. Moscow, Forest industry, 1964; 248. (rus.).
93. Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adhesion of solids*. Moscow, Nauka, 1973; 278. (rus.).

Received July 27, 2020

Adopted in revised form on September 28, 2020

Approved for publication on October 30, 2020.

**B I O N O T E S:** **Sergei S. Inozemtcev** — Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Scientific and Educational Center “Nanomaterials and Nanotechnologies”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 623809, Scopus: 56433487700, ResearcherID: D-1295-2016, ORCID: 0000-0002-2965-0846; inozemtsevss@mail.ru;

**Do Toan Trong** — postgraduate student of the Department of Building Materials and Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; trongtoan007@gmail.com.

# БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 711

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439

## Исследование запыленности воздуха городской среды

Фан Тхи Ан<sup>1</sup>, И.С. Шукуров<sup>1</sup>, Фам Ван Лыонг<sup>1</sup>, Л.И. Шукурова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Самаркандский государственный архитектурно-строительный институт; г. Самарканд, Узбекистан*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ханой — столица Социалистической Республики Вьетнам. Город Ханой развивается по следующей схеме: центральный район и окружающие спутники (5 городов) вокруг него соединены с центром с помощью транспортных систем: железнодорожной, автомобильной, системы речного транспорта и т.д. Качество воздуха из-за увеличения численности населения, средств личного транспорта, промышленных предприятий и других источников выбросов ухудшается, и все это оказывает сильное влияние на здоровье людей и состояние окружающей среды.

**Материалы и методы.** Используются данные об уровне пыли PM2.5, полученные с двух автоматических станций мониторинга воздушной среды, расположенных в северном центре мониторинга окружающей среды в Управлении охраны окружающей среды Вьетнама и в посольстве США во Вьетнаме. Статистические методы оценки и анализа были применены для оценки разницы в концентрации пыли PM2.5 на этапах городского развития.

**Результаты.** Проблема загрязнения PM2.5 во Вьетнаме стоит очень остро, потому что это серьезно угрожает здоровью населения. Для жилых районов, расположенных в городских кварталах, страдающих от дорожного движения и промышленного развития, уровень загрязнения по-прежнему превышает допустимый предел QCVN. Напротив, в жилых районах в пригородных зонах уровни загрязнения воздуха ниже.

**Выводы.** Рассматриваются последствия загрязнения окружающей среды, вызванного мелкой пылью PM2.5, в результате урбанизации в г. Ханое и некоторые решения городского планирования для уменьшения степени загрязнений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** загрязнение окружающей среды, мониторинг воздушной среды, урбанизация, городское планирование, запыленность воздуха, городская среда, окружающая среда, дорожное движение, PM2.5

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Фан Тхи Ан, Шукуров И.С., Фам Ван Лыонг, Шукурова Л.И. Исследование запыленности воздуха городской среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1425–1439. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439

## A study of the dust content in the air of the urban environment

Phan Thi An<sup>1</sup>, Ilkhomzhon S. Shukurov<sup>1</sup>, Pham Van Luong<sup>1</sup>, Lola I. Shukurova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Samarkand State Institute Architecture and Civil Engineering; Samarkand, Uzbekistan*

### ABSTRACT

**Introduction.** Hanoi is the capital of the Socialist Republic of Vietnam. Hanoi grows according to the following pattern: its central district has several satellites (5 cities) that are accessible by transport systems such as railways, motorways, waterways, etc. Air quality gets worse due to the growing number of urban residents, their personal vehicles, industrial development and other sources of emissions, and each of these factors has a great impact on human health and the state of the environment.

**Materials and methods.** This study uses PM2.5 data generated by two automatic air monitoring stations located in the northern centre for environmental monitoring of the Environmental Protection Agency of Vietnam and the US Embassy in Vietnam. Methods of statistical assessment and analysis were applied to evaluate the difference in PM2.5 dust concentration at different stages of urban development.

**Results.** The problem of PM2.5 pollution in Vietnam is particularly relevant, because it threatens public health. In residential areas located in urban neighborhoods notorious for heavy traffic and industrial enterprises, pollution levels still exceed admissible QCVN limits. On the contrary, air pollution is lower in suburban residential areas.

**Conclusions.** The paper discusses the consequences of environmental pollution, caused by PM2.5 fine dust as a result of urbanization in Hanoi, and analyses urban planning solutions aimed at pollution reduction.

**KEYWORDS:** environmental pollution, air monitoring, urbanization, urban planning, dust content in the air, urban environment, environment, traffic, PM2.5

**FOR CITATION:** Phan Thi An, Shukurov I.S., Pham Van Luong, Shukurova L.I. A study of the dust content in the air of the urban environment. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(10):1425-1439. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Вьетнам имеет площадь 331 690 км<sup>2</sup>, расположен на востоке п-ва Индокитай, относится к юго-восточному Азиатскому региону. Общие границы имеет с тремя странами: Северный Вьетнам граничит с Китаем, на западе — с Лаосом и Камбоджей, с востока омывается Восточным морем. В 2019 г. население Вьетнама составляло около 95 млн человек, т.е. Вьетнам занимает 13-е место в мире по численности населения.

Ханой — столица Социалистической Республики Вьетнам. В соответствии с постановлением правительства Вьетнама № 1259/QĐ-ТТг от 26/07/2011 «Об утверждении генерального плана строительства Ханойской столицы до 2030 года и перспективы развития до 2050 года»<sup>1</sup>, столица Ханой после расширения будет иметь естественную площадь 334 470,02 га, в 3 раза превысит предыдущую и будет занимать 17-е место среди столиц мира, которые имеют самые большие площади; население увеличится в полтора раза; столица будет иметь 30 административных единиц, 12 округов, 17 районов и один город<sup>2</sup>.

12 округов включают в себя: Бак Ты Лиен, Ба Динь, Кау Заи, ДонгДа, Хай Ба Чынг, Хоанг Кием, Ха Донг, Хоанг Май, Лонг Биен, Тхань Хуан, Тау Хо и Ты Лиен.

17 районов включают: Дан Фуонг, За Лам, Донг Ань, Чуонг Ми, Хоай Дык, Ба Ви, Ми Дык, Фу Тхо, Ме Линь, Сок Сон, Тхач Тхат, Куок Оай, Тхань Чи, Тхьонг Тин, Тхань Оай, Фу Сюйен и Ынг Хоа и один город (Сон Таи).

Однако, наряду с экономическим ростом и процессом урбанизации, наблюдается загрязнение окружающей среды. Особенно необходим контроль за загрязнением в связи с возникновением проблемы общественного здравоохранения, так как загрязнения вызывают серьезную деградацию окружающей среды, включая воздух, воду, землю и парниковые газы. Эти факторы подрывают потенциал устойчивого развития и оказывают негативное воздействие на группы населения с низкими доходами.

<sup>1</sup> Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 1259/QĐ-ТТг, ngày 26/07/2011, về phê duyệt Quy hoạch chung xây dựng Thủ đô Hà Nội đến năm 2030 và tầm nhìn đến năm 2050 (Премьер-министр, Постановление № 1259/QĐ-ТТг от 26.07.2011 об утверждении генерального плана строительства столицы Ханой до 2030 года и концепции до 2050 года).

<sup>2</sup> Quốc hội, Nghị quyết số 22/2003/QH11 ngày 26 tháng 11 năm 2003 về việc chia và điều chỉnh địa giới hành chính một số tỉnh (2003), Nghị quyết số 15/2008/QH12 của Quốc hội về việc điều chỉnh địa giới hành chính Hà Nội (Национальное собрание, Резолюция № 22/2003/QH11 от 26.11.2003 о разделении и корректировке административных границ некоторых провинций (2003 год), Резолюция № 15/2008/QH12 Национального собрания о внесении изменений в административные границы г. Ханой).

Доклад организации Global Alliance on Health and Pollution (Глобальный альянс по вопросам здоровья и загрязнения окружающей среды), опубликованный в декабре 2019 г.<sup>3</sup>, показывает, что из-за загрязнения окружающей среды во Вьетнаме погибло более 71 300 человек, из которых более 50 000 человек пострадали от загрязнения воздуха. Так, по числу смертей от загрязнения окружающей среды Вьетнам занимает четвертое место в западной части Тихого океана, уступая лишь Китаю (1,8 млн человек), Филиппинам (86 650 человек) и Японии (82 046 человек).

Загрязнение воздуха оказывает огромное влияние на здоровье людей. Согласно недавнему докладу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) «бремя болезней международных» — это пыль PM2.5 (пыль размером менее 2,5 мкг/м<sup>3</sup>), которая занимает 5-е место среди 300 факторов, вызывающих смерть (4,2 млн смертей в год в мире).

Ханой является самым сильно загрязненным городом по качеству воздуха во Вьетнаме и в юго-восточном азиатском регионе. Загрязнение мелкой пылью в последнее время поднялось до тревожных уровней, количество пыли в Ханое в несколько раз превышает допустимый уровень.

Согласно обзорам ВОЗ, Ханой — город с высоким уровнем пылевого загрязнения [1] со средними значениями года PM10 и PM2.5, находящимися в высоком диапазоне (73,5 мкг/м<sup>3</sup> и 47,45 мкг/м<sup>3</sup> соответственно). Показатели пыли PM10 и PM2.5 превышают предельно допустимые значения в соответствии с нормативным документом QCVN 05:2013/BTNMT и в среднем за 24 часа, как правило, увеличиваются<sup>4</sup>.

Чтобы внести свой вклад в решение этого очень важного вопроса в рамках статьи авторы сосредотачиваются на трех основных аспектах:

- обзор экологической ситуации Ханоя;
- влияние на окружающую среду мелкодисперсной пыли PM2.5;
- рекомендации по снижению загрязнения окружающей среды и особенно мелкодисперсной пыли PM2.5.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Обзор планирования столицы Вьетнама г. Ханой

#### География

Расположенный на северо-западе центральных равнин дельты Красной реки, г. Ханой имеет местоположение от 20°53' до 21°23' северной широты

<sup>3</sup> Global Alliance on Health and Pollution (GAHP), Pollution and Health Metrics: Global, Regional and Country Analysis report, 2019.

<sup>4</sup> BTNMT (2013a) QCVN 05:2013, столица Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Chất lượng không khí xung quanh (QCVN 05:2013/BTNMT Национальный технический регламент о качестве атмосферного воздуха).



Рис. 1. Административная карта г. Ханой и карта загрязнения воздуха во Вьетнаме  
 Fig. 1. District map of Hanoi and air pollution map of Vietnam

и 105°44' до 106°02' восточной долготы, на севере он граничит с провинцией Тхайнгуен, Виньфук; на юге — с Ханам, Хоабинь; на востоке — с Бакзианг, Бакнинь и Хынгйен; на западе — с Хоабинь и Фу Тхо<sup>5</sup>. Город Ханой и морской порт Хайфон, в 120 км от города Намдинь, образуют 3 главные точки дельты Красной реки. 8 января 2008 г. после расширения административных границ Ханой имеет площадь 3344,7 км<sup>2</sup>, располагаясь по обе стороны Красной реки, хотя раньше город находился в основном на правом берегу. На рис. 1 представлена административная карта г. Ханой<sup>5</sup>.

**История развития г. Ханой<sup>1, 4, 5</sup>**

*А. Древнейшая история*

В 1010 г. король Ли Конг Уан перенес столицу из Хоа Лы в Дай Ла и начал строительство столицы Тханг Лонг, ограничив город Красной рекой, рекой Кимнгы и рекой То. К западу от городской застройки сегодня находится 36 улиц г. Ханой.

*Б. Период французской колонии с 1888 по 1945 гг.*

Ханой — столица Федерации Индокитай. Планировка г. Ханой французами была расширяющейся на юг. В 1921 г. Ханой насчитывал около 4000 жителей из Европы и 100 000 местных жителей<sup>5</sup>. Из-за влияния европейской культуры, Ханой постепенно приобретал облик европейской метрополии. Ниже представлены карты г. Ханой с изменениями границ города: Ханой в 1902 г. (рис. 2); Ханой в 1920 (рис. 3) и в 1943 г. (рис. 4).

<sup>5</sup> «Thành phố Hà Nội». Tổng cục Du lịch Việt Nam. Truy cập ngày 1 tháng 10 năm 2010 («Ханой столица»). Национальная администрация туризма Вьетнама. Получено 1 октября 2010 г.).



Рис. 2. Карта г. Ханой в 1902 г.  
 Fig. 2. Map of Hanoi, 1902

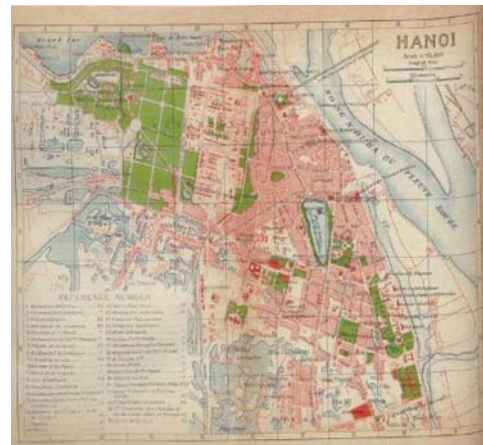


Рис. 3. Карта г. Ханой в 1920 г.  
 Fig. 3. Map of Hanoi, 1920



Рис. 4. Карта г. Ханой в 1943 г.  
Fig. 4. Map of Hanoi, 1943



Рис. 5. Карта центра г. Ханой в период с 1954 по 1960 гг.  
Fig. 5. Map of Hanoi city centre in 1954–1960

*В. Ханой в период формирования социализма и до настоящего времени*

*1. Период 1945–1975 гг.<sup>1</sup>*

После войны (1954 г.) Ханой и север Вьетнама приступили к реконструкции зданий и развитию экономических, культурных и социальных сфер деятельности страны, разделенной на северные и южные регионы (около 20 лет).

Генеральный план Ханоя 1954–1960 гг. — ориентированная застройка города, которая идеально расположена на правом берегу Красной реки. Центральный регион — это Бадинь Хоан Кiem и южная часть Западного озера. Площадь земельного участка — 700 га (рис. 5).

Генеральный план Ханоя 1960–1964 гг. — первый картографический проект «общий план ханойской столицы» был завершен в 1960 г. с помощью советских специалистов (рис. 6). Ориентация города развивалась в основном в южном районе Красной реки и частично в северном районе (Залам, Донгань). В основном на северо-западе региона, Футхьонг, Ласуан, Суандинь, Конуе, на западе в районе Каузиай, Зичьвонг, Йенхоа, Чунгхоа; юго-запад в основном вдоль проспекта QL6, юг в основном регион Запбат.

Общая площадь занимает 2000 га. Население — 380 000 человек. Административное деление города состоит из 4-х районов, 4-х пригородных районов.

*2. Период 1975–2010 гг.<sup>1</sup>*

*Первоначальный план планировки г. Ханой до 1979 г.*

Расширение столицы во все стороны. Архитекторы соединяют столицу с городом Вьиниен про-

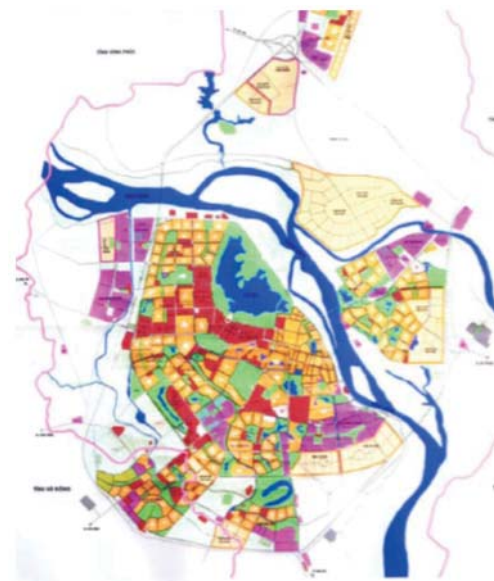


Рис. 6. Общая карта г. Ханой в период с 1960 по 1964 гг.  
Fig. 6. Map of Hanoi in 1960–1964

спектом. После 1979 г. план был изменен, развитие столицы сосредоточено в южной области Красной реки со следующими размерами территории: площадь — 13 550 га, население — 1,5 млн чел. (до 2000 г.). Административное деление города — пригородная часть расширена до Бави, Винь Фук. Общая площадь — 2130 м<sup>2</sup>.

*Планирование г. Ханой в 1981 г.*

Совместно с советскими специалистами из Института планирования Ленинграда (1961 г.) генеральный план столицы г. Ханой до 2000 г. был завершен и утвержден решением № 100/CP от 24/4/1981 г.

Это — генеральный план столицы Ханой, который должен быть изучен в полном объеме с определением ориентации развития и расчетами норм, важных для периода в 20 лет (1981–2000 гг.). Масштаб и площадь — 13 500 га; население — 1,5–1,7 млн чел., показатель плотности заселения городских земельных участков составляет 90 м<sup>2</sup>/чел. Ширина административной границы — 2123 м<sup>2</sup>, население — 2 462 105 чел. (рис. 7).



**Рис. 7.** Общая карта г. Ханой в период с 1981 по 2000 гг.  
**Fig. 7.** Map of Hanoi in 1981–2000

#### *Планирование г. Ханой в 1996 г.*

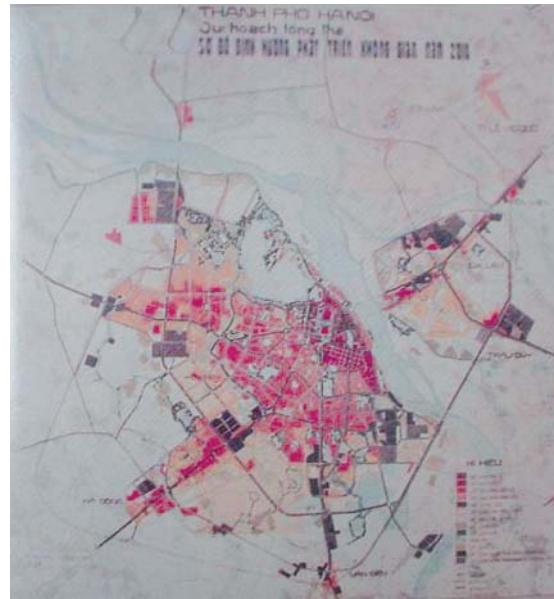
Столица Ханой рассматривается как ключевая точка для экономического развития севера. Однако в конце 80-х – начале 90-х гг. планировщики определили масштабы города слишком большими, не соответствующими социально-экономической ситуации столицы, отсутствовали условия для инвестиций в основное строительство, особенно в инфраструктурное строительство городских технических объектов.

Ханой входит в число больших мегаполисов Азии. Население составляет 1,3 млн чел. на начальном этапе и до 2010 г. население увеличилось до 1,5 млн чел. (при наличии резервных земель и других условий растет до 1,7–2,0 млн чел.) со скоростью развития 1,5 % (рис. 8).

Город развивался в основном вдоль главных дорог, которые являются воротами в столицу.

#### *Планирование г. Ханой в 1998 г.*

Долгосрочное направление развития г. Ханой в основном направлено на запад, образуя цепочки городских кварталов Миумон – Хоалак – Сонтай (провинция Хагай); на севере расположены города Соксон (Ханой) – Сюаньхоа – Дайлай – Фукиен



**Рис. 8.** Диаграмма пространственной ориентации развития г. Ханой до 2010 г. — генеральный план г. Ханой, подготовленный в 1992 г. (Источник: Ханойский институт планирования строительства)

**Fig. 8.** The diagram of spatial development of Hanoi through 2010 — a master plan of Hanoi made in 1992 (Source: Hanoi Institute for Construction Planning)

(провинция Винь Фук) и другие города с целью использования преимуществ географического положения, природных условий, транспорта и инфраструктуры. Направления расширения — на северо-запад, юго-запад и север, в котором приоритетное развитие отводится северным районам Красной реки.

Население центра города составляет 2,5 млн чел.; западной части города — 1 млн чел.; северной части города — 0,5 млн чел. (рис. 9).

#### *Планировка г. Ханой в 2010 г.*

26 июля 2011 г. решением № 1259/QĐ-ТТг премьер-министр утвердил генеральный план строительства г. Ханой до 2030 г. и дальнейшее развитие до 2050 г. международной консалтинговой компанией Perkins Eastman – Posco E&C – Jina Architects Co.Ltd (PJ) вместе с консультантами в стране, включая Институт архитектуры, градостроительства и сельского хозяйства (VIAP) и Институт планирования строительства в Ханое (HUPI)<sup>1</sup>.

Столица Ханой растет в соответствии с моделью конурбации, включающей: 1 городской центр, 5 городов-спутников, имеющих городское и сельское расположение и соединенных системой кольцевых дорог в сочетании с осевыми направлениями, имеющих связь с коммуникационной сетью столичного региона и страны. Центр г. Ханой отделен от городов-спутников зеленым коридором.

Население по прогнозу всего города к 2020 г. составит примерно 7,3–7,9 млн чел., к 2030 г. — около

ло 9,0–9,2 млн чел., к 2050 г. — около 10,8 млн чел. При этом к 2020 г. городское население составит около 4,6 млн чел., к 2030 г. — около 6,2 млн чел., а к 2050 г. — около 7,5 млн чел. На рис. 10 показана карта планировки развития г. Ханой до 2030 г.

Можно сказать, что история развития столицы г. Ханой связана с процессом урбанизации.

Урбанизация, быстро нарастающая при высоком росте экономики, приводит к тому, что процесс миграции из сельской местности в города, из соседних с г. Ханой провинций становится невозможно контролировать, нарушается структура населения со следующими последствиями:

1) увеличение численности населения бесконтрольно растет, с особым акцентом на центральную зону, что приводит к перегрузке систем, инфраструктуры и технической инфраструктуры муниципалитета;

2) быстрый рост урбанизации вызвал проблемы, которые ежедневно ставятся перед менеджерами, политиками: перегрузка, риск дорожных пробок, наводнений; пыль, шум; загрязнения воздуха и воды, эти проблемы становятся все более актуальными.

### Природа г. Ханой

#### А. Рельеф

Столица г. Ханой имеет 3 формы рельефа, основными из которых являются: равнины, средние земли, низкие горы и высокие горы. Благодаря наносному грунту три четверти природной

территории равнины расположены на берегу р. Да, по обе стороны Красной реки и притоков других рек. Рельеф местности ниже в направлении с севера на юг и с запада на восток со средней высотой от 5 до 20 м над уровнем моря. Холмистая часть района Соксон – Бави – Куокоай – Мидык с вершинами высотой 1,281 м Бави, Зазе — 707 м, Чанчим — 462 м, Тханьлянь — 427 м, Тьенчу — 378 м<sup>6</sup>.

#### Б. Климат

Климат типичен для тропической муссонной зоны с двумя основными сезонами в году: жаркий и холодный. Жаркий сезон с апреля по октябрь: жарко, влажно и дождливо, преобладает направление ветра юго-восточное, часто бывают грозы. Холодный сезон в Ханое начинается в ноябре и обычно заканчивается в марте.

#### В. Гидрология

Ханой расположен рядом с Красной рекой и рекой Да, двумя главными реками Севера Вьетнама. Кроме того, в Ханое также есть много рек, прудов и озер, таких как р. Нхуэ, р. Даи, р. Толич, р. Лу, р. Сет, р. Буй, р. Дуонг, р. Кало и т.д., в результате чего реки и пруды перекрещиваются. Система рек является

<sup>6</sup> Bộ Tài Nguyên Môi trường, “Báo cáo hiện trạng môi trường Quốc gia năm 2016. Chương 2: Môi trường không khí”. 2017. Vol. 2. Pp. 25–45. (Министерство природных ресурсов и экологии, Отчет о текущем состоянии окружающей среды в 2016 году. Глава 2: Воздушная среда. 2017. Вып. 2, С. 25–45).

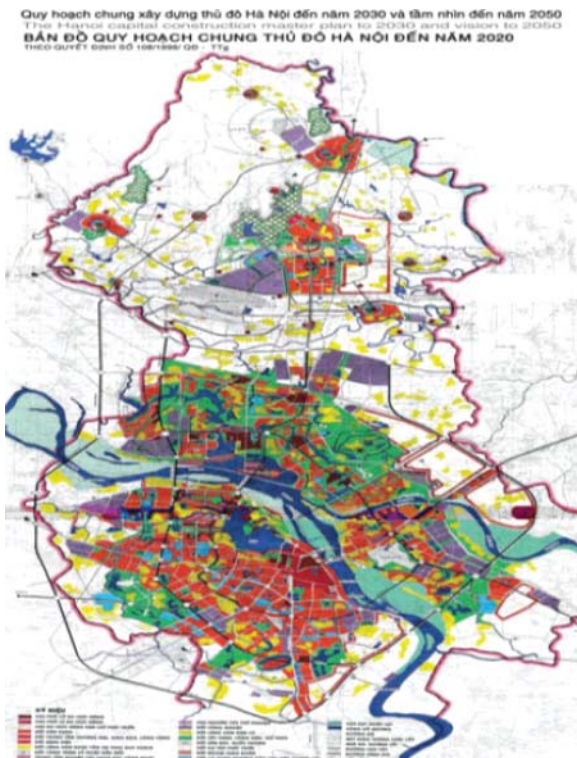


Рис. 9. Карта планировки развития г. Ханой до 2020 г.  
Fig. 9. Hanoi development map through 2020



Рис. 10. Карта планировки развития г. Ханой до 2030 г.  
Fig. 10. Hanoi development map through 2030

ресурсом для развития водного транспорта, водоснабжения и наносного грунта для сельского хозяйства, дренажа и улучшения микроклимата для города.

#### Г. Экосистема

По всему городу насчитывается 36 озер, больших и малых, на долю которых приходится 10 % площади суши г. Ханой. С развитием процесса урбанизации наиболее серьезно пострадала экология г. Ханой. На сегодняшний день площадь и количество прудов сократились, что вызывает тревогу. Вместе с уменьшением площади водохранилища, а также внутренним кондиционированием воздуха в центре г. Ханой происходит резкое снижение биоразнообразия.

#### Социально-экономические характеристики

Ханой развивается достаточно хорошо и процветает, темпы экономического роста всегда находятся на высоком уровне по сравнению с остальной страной (около 11–12 %). С 2000 г. город добился больших успехов в экономическом и социальном развитии: темпы роста ВВП ежегодно в 2001–2005 гг. достигали в среднем 11,3 %, доля ВВП Ханоя составляла 45 % от всех городов дельты Красной реки.

Общий объем продукции на территории (валовой региональный внутренний продукт ВРВП) в 2019 г. оценивается ростом на 7,46 % (в 2018 г. — всего на 7,12 %), и это самый высокий прирост за 4 года, достигаемый планом, тем выше прирост ВВП страны (6,8 %). Сфера услуг выросла на 6,8 %, промышленность – строительство — на 9,16 %, сельское хозяйство – лесное хозяйство и рыболовство — на 0,96 %. Структура экономики сместилась позитивно, в настоящее время сектор услуг, промышленность и строительство составляют 86,89 %; ВРВП населения в 2014 г. (~3500 долл./чел./год); в 2019 г. оценивается в 5,400 долл./чел./год<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> GSO (2020) Niên giám Thống kê 2019, 2018, 2015, 2009, 2005. Tổng cục Thống kê, Hà Nội, Việt Nam (GSO (2020) Статистический ежегодник 2019, 2018, 2015, 2009, 2005. Главное статистическое управление, г. Ханой, Вьетнам).

Развитие сферы культуры и инфраструктуры города — важные достижения, отвечающие потребностям жителей города.

#### Население

Население распределено неравномерно, сосредоточено в городских округах, средняя плотность населения составляет 1926 чел. на м<sup>2</sup>. Темпы урбанизации развиваются относительно быстро, к 2018 г. в Ханое насчитывали 40,8 % городского населения, что соответствует 3 068 440 чел., и 59,2 % сельского населения, что соответствует 4 452 250 чел. (табл. 1)<sup>7</sup>.

Быстрый рост населения в процессе урбанизации, отсутствие хорошего планирования привели к тому, что Ханой стал тесным, загрязненным, с транспортными потоками и частыми пробками. Большая часть архитектурного наследия постепенно исчезает. Ханой — это город, который развивается неравномерно по отношению к другим регионам. В некоторых городских и пригородных районах многие люди все еще не имеют необходимых условий жизни. Кроме того, Ханой — один из самых загрязненных городов Юго-Восточной Азии, количество пыли здесь в несколько раз превышает допустимый уровень [2, 3].

#### Источники и некоторые результаты мониторинга PM2.5 в атмосферном воздухе в г. Ханой

Согласно отчетам о состоянии окружающей среды в воздухе в 2016 г.<sup>6</sup>, в крупных городах, таких как Ханой, уровень пыли в последние годы, как правило, повышается, что сказывается на здоровье людей. Согласно отчету ВОЗ, концентрация пыли PM2.5 в точках мониторинга превышает допустимый предел воздуха (среднегодовой), указанный в QCVN 05:2013/VTNMT, в 2–3 раза. Частота дней с концентрацией пыли выше допустимого предела довольно большая, особенно на дорогах больших городов. В отчете также указывается, что основными источниками загрязнения воздуха в городах являются транспорт, строительство, городское производство, жилые помещения и обработка отходов.

Табл. 1. Состояние населения г. Ханой за период 2004–2018 гг.

Table 1. Hanoi population in 2004–2018

Номер The number	Название города The city	2004	2007	2008	2009	2011	2015	2018
I	Ханой до расширения, млн чел. Hanoi, prior to expansion, in mln. residents	2,0199	2,2054	2,2798				
II	Ханой после расширения, млн чел. Hanoi, after the expansion, in mln. residents			6,233(*)	6,451	6,7613	7,216	7,5207

Примечание: (\*) — после самого последнего расширения границ города 8 января 2008 г. Ханой имеет прирост населения в 2,2798 млн человек: цифра выросла до 6,233 млн жителей, населяющих 17 столичных районов. Такие темпы роста являются крупнейшими в мире<sup>2</sup>.

Note: (\*) — Following the most recent expansion of urban borders on January 8, 2008, Hanoi population grew by 2.2798 residents: their number went up to 6.233. They reside in 17 urban districts. Hanoi demonstrates the highest urban population growth rate in the world.

Среднегодовая концентрация пыли PM2.5 на двух автоматических станциях мониторинга воздушной среды превысила допустимый уровень, указанный в QCVN 05:2013/VTNMT для качества атмосферного воздуха (рис. 11–14).

Концентрация пыли PM2.5 непрерывно собиралась на двух автоматических станциях мониторинга воздуха: станции, расположенной в Региональном центре экологического мониторинга под управлением Главного управления окружающей среды (№ 556 Нгуен Ван Ку), и станции мониторинга, которая принадлежит посольству США во Вьетнаме (расположено в 7 Ланг Ха).

Показатель загрязнения окружающей среды в районе Департамента имеет содержание PM2.5,

превышающее допустимое в 1,02 раза, а в районе станции посольства США содержание PM2.5, превышающее допустимый стандарт в 1,7 раза [4].

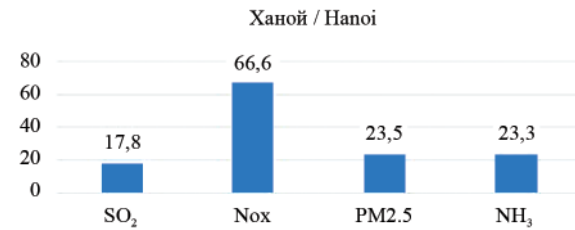


Рис. 11. Предварительные оценки PM2.5 (тыс. т), выбросы прекурсоров на 2015 г. [5]

Fig. 11. Preliminary PM2.5 assessments (in thousand tons), precursor emissions as of 2015 [5]

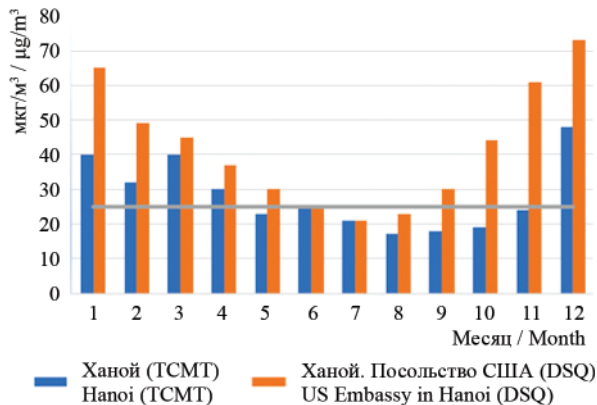


Рис. 12. Среднее изменение концентрации пыли PM2.5 по месяцам в Главном управлении окружающей среды

Fig. 12. Average per-month PM2.5 dust concentration change. Information provided by Chief Environmental Protection Agency

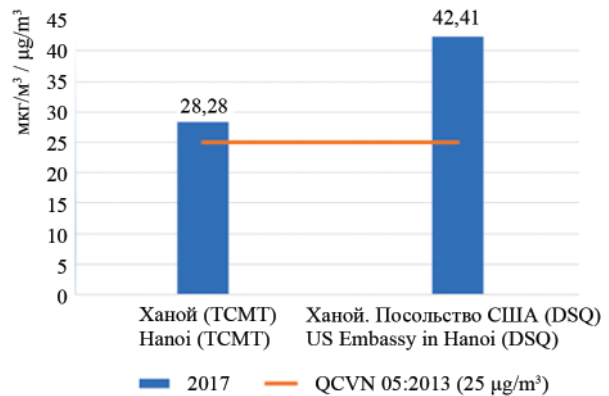


Рис. 13. Среднее содержание пыли PM2.5 в 2017 г. на двух станциях автоматического мониторинга воздуха

Fig. 13. Average PM2.5 dust content in 2017 at two automatic air monitoring stations

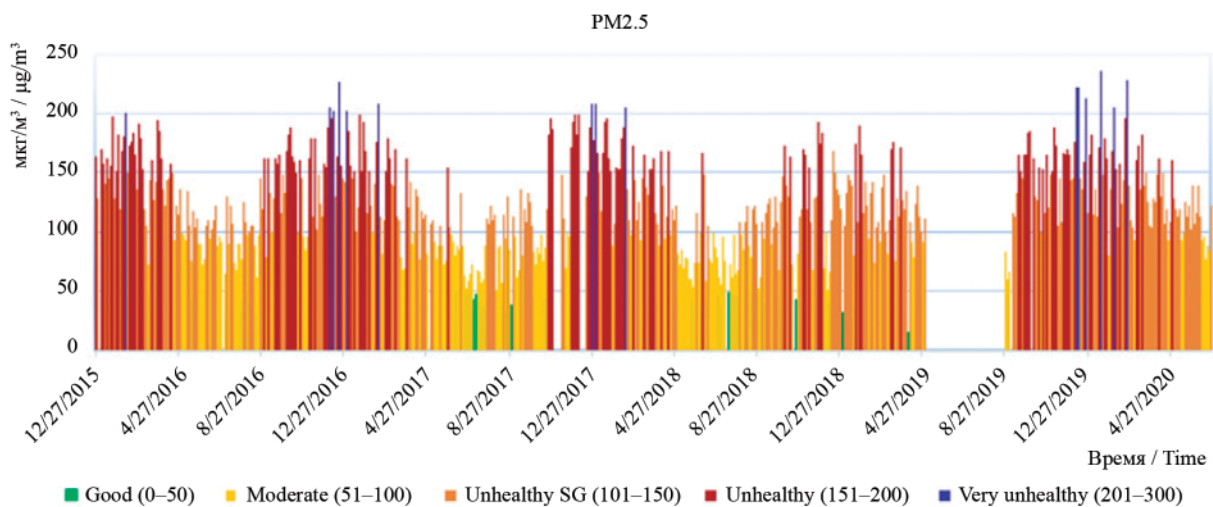
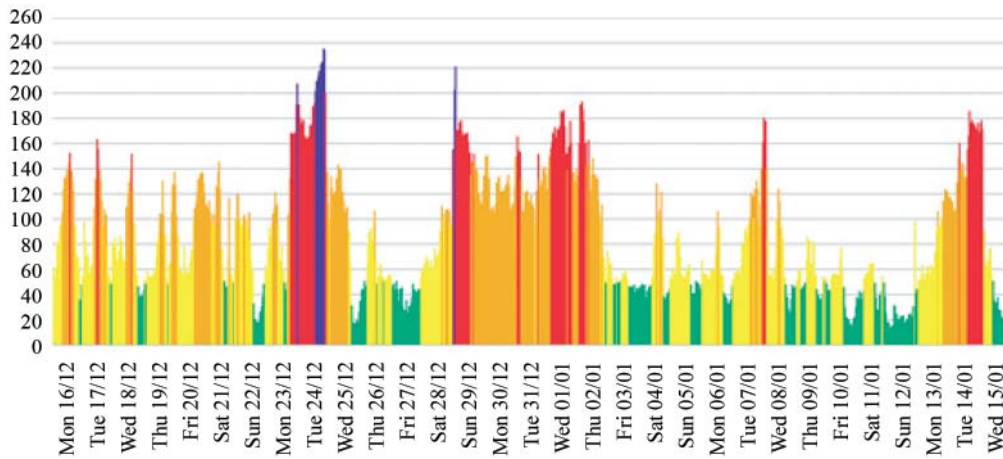


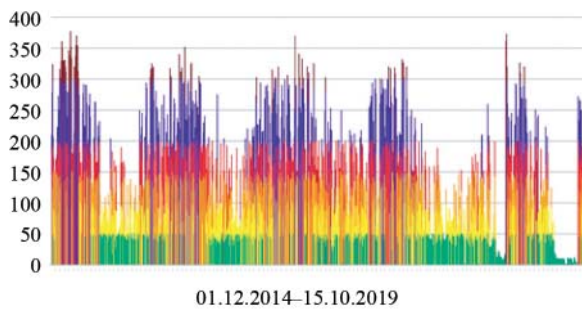
Рис. 14. Данные мониторинга PM2.5 на автоматической станции посольства США с 2016 г. по настоящее время

Fig. 14. PM2.5 dust monitoring data provided by the automatic monitoring station of US Embassy, 2016 — present



**Рис. 15.** Показатели качества воздуха (PM2.5 AQI, в среднем 60 мин, данные за 30 дней)  
**Fig. 15.** Air quality indicators (PM2.5 AQI, 60 min average, data covering a period of 30 days)

Мониторинг результатов анализа пыли PM2,5 в некоторых районах г. Ханой показан на рис. 12–16.



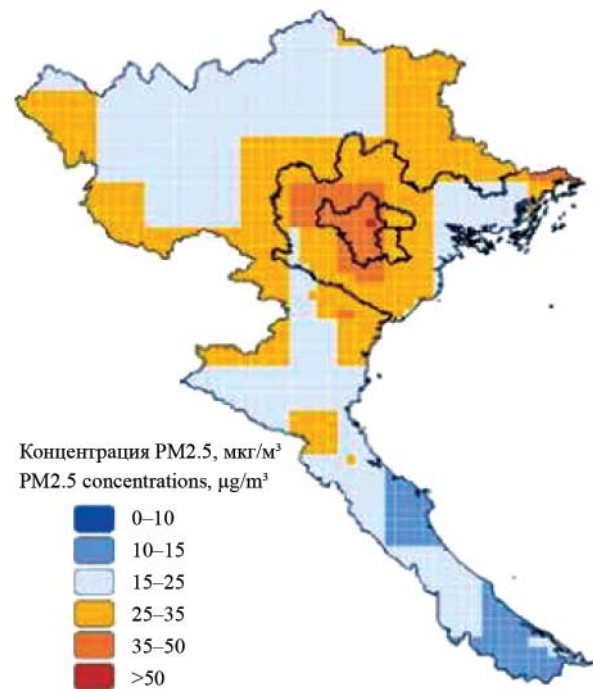
**Рис. 16.** Показатели качества воздуха за все время  
**Fig. 16.** Air quality indicators for all years to date

Измерения вблизи осей движения также показывают, что регулярность концентрации пыли PM2.5 часто увеличивается в час пик из-за наибольшего количества транспортных средств на дороге в это время. Со среднегодовым темпом роста в 15 % для мотоциклов и 10 % для легковых автомобилей в 1996 г. в городе насчитывалось 600 000 мотоциклов и 34 000 автомобилей, но через 10 лет количество автомобилей увеличилось в 4,4 раза (150 000), мотоциклов — в 2,6 раза (1,55 млн), что является одним из основных источников загрязнения воздуха на транспортных маршрутах Ханоя<sup>6</sup> [6].

Скорость урбанизации в г. Ханое довольно быстрая и интенсивная, город похож на большую «стройплощадку». В настоящее время в городе действует более 1000 крупных и малых строительных объектов. В том числе десятки проектов реконструкции, строительства перекрестков, новых городских районов; крупномасштабные проекты, период строительства которых длится годами,

вызывая загрязнение пылью на большой площади. Для строительной площадки загрязнение пылью территорий вокруг строительных площадок является относительно серьезным и остается на высоком уровне в течение длительных периодов времени, соответствующих периоду строительных работ.

На воздушную среду влияют не только вышеперечисленные факторы, но и повседневная деятельность людей, ремесленных деревень (гончарная



**Рис. 17.** Концентрации в атмосферном воздухе PM2.5 были смоделированы на 2015 г. (среднегодовая концентрация, мкг/м<sup>3</sup>) [5, 7]

**Fig. 17.** PM2.5 concentrations in the open air were simulated for 2015 (average annual concentration, µg/m<sup>3</sup>) [5, 7]

**Табл. 2.** Процент взрослых и детей, пострадавших от респираторных заболеваний, % [8]

**Table 2.** Percentage of adults and children suffering from respiratory diseases, % [8]

Город Ханой Hanoi	Ринит Rhinitis	Больное горло Sore throat	Острый бронхит Acute bronchitis	Хронический бронхит Chronical bronchitis	Удушье Suffocation
Взрослые люди Adults	51,5	59,2	6,8	2,4	1,87
Дети Children	54,2	63,64	20,11	12,34	1,05

мастерская Бат-Транг, Триу-Хук) и ремесленное производство, разбросанное по аллеям, жилым районам (особенно в пригородных районах) также имеют значительные воздействия. Ежедневная жизнедеятельность людей производит очень большое количество отходов, а количество долгосрочных отходов, которые не собираются, также оказывает влияние на воздушную среду. Все это мешает городу контролировать и минимизировать загрязнение воздуха [8, 9].

Однако в жилых районах уровень загрязнения пылью во много раз ниже, чем у транспортных осей и строительных площадок. Для жилых кварталов, расположенных в городских районах, страдающих от дорожного движения и промышленного развития, уровень загрязнения по-прежнему превышает допустимый предел QCVN. Напротив, в жилых районах в пригородных зонах уровень загрязнения воздуха ниже.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Воздействие загрязнения воздуха из-за мелкой пыли PM2.5 в г. Ханой

*Воздействие загрязнения воздуха на здоровье человека*

В 2015 г., согласно оценкам Доклада о глобальном увеличении болезней, пыль PM2.5 стала причиной 42,2 тыс. смертей во Вьетнаме [10–12]. Среди них 4,9 тыс. случаев — заболевания нижних дыхательных путей у детей до 5 лет; 5,3 тыс. случаев рака легких и бронхов; и 26 тыс. случаев сердечно-сосудистых заболеваний у взрослых. В том же докладе указывалось, что все вьетнамцы потеряли 806,9 года жизни в результате смерти от заболеваний, связанных с загрязнением воздуха<sup>8, 9</sup> [10] (рис. 17).

Между тем, исследование в г. Ханой показало, что PM1, PM2.5 и PM10 увеличились на 2,5, 2,2 % соответственно, а процент госпитализаций по поводу респираторных заболеваний в целом вырос на 1,4 % [13]. Другое исследование [14, 15] также

показало, что при увеличении NO<sub>2</sub> на 22 мг/м<sup>3</sup> число госпитализаций, вызванных пневмонией у детей в г. Ханое, увеличилось на 6,1 %, а число заболеваний астмой и бронхитом увеличилось на 5,5 % (табл. 2).

Также, согласно исследованию, проведенному Гуо и его коллегами из Гонконга, было показано, что полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) составляют 50–82 % в PM2.5 и PM10, в основном содержатся в PM2.5 [15]. По словам Гуо и его коллег, ПАУ и родственные соединения являются канцерогенами, вызывающими мутации генов и тератогенов и оказывающими различное токсическое воздействие на людей и животных [16].

Экономические потери из-за загрязнения воздуха, влияющего на здоровье жителей г. Ханой, включают расходы на медицинское обследование и лечение, потерю рабочих дней из-за отпуска по болезни и потерю времени для ухаживающих за больными. Заботе о больных в г. Ханой уделяется большое внимание.

*Влияние на профессию.* Из-за загрязнения воздуха некоторые виды деятельности не могут быть выполнены (например, туризм, торговля, учеба и т.д.).

*Воздействие на организмы.* Это — потери, вызванные снижением урожайности сельскохозяйственных культур и животноводства, по сравнению со средней урожайностью из-за последствий загрязнения воздуха.

*Воздействие на имущество.* Данный ущерб определяется путем расчета затрат на ремонт, замену, предотвращение и восстановление свойств, поврежденных загрязнением воздуха в результате промышленной деятельности.

На самом деле причиненный ущерб всегда больше, чем то, что люди могут оценить и перечислить. Поэтому количественно оценить ущерб, причиненный загрязнением воздуха, непросто.

## ВЫВОДЫ

**Предложение некоторых градостроительных решений для уменьшения загрязнения окружающей среды, вызванного мелкой пылью PM2.5 в г. Ханое, в процессе урбанизации**

Загрязнение воздуха является проблемой, связанной со многими экономическими, социальными и экологическими аспектами, поэтому поиск решений не прост. Для того чтобы принять эффективные меры по предотвращению загрязнения и улучшению качества городского воздуха, необходимо сначала точно определить источники отходов и основные причины загрязнения окружающей среды:

- состав автомобилей в Ханое, большую часть которых составляют мотоциклы (85 %), причем некоторые мотоциклы не очень хорошего качества, общественного транспорта очень мало;
- площадь поверхности дороги в Ханое слишком мала по сравнению с общей площадью, что означает, что площадь для транспортных средств очень мала. До 2008 г. на эту территорию приходилось всего 1,9 % внутренней части города, что незначительно по сравнению с мировым опытом, поэтому транспортным средствам приходилось двигаться близко друг к другу;
- в городской структуре г. Ханой мало места для деревьев, озер, а все запланированные пространства, как правило, очень многолюдные.

Согласно мировым исследованиям, концентрация загрязнения сильно зависит от плотности населения. Чем больше населенных пунктов, тем выше загрязнение. С высокой плотностью населения дома стоят тесно, дороги тесны, нет места для естественного удаления загрязнений. Еще один важный фактор — сухой сезон, который делает Ханой очень пыльным в начале этого периода.

Другой феномен — восхождение теплых потоков воздуха, когда температура не уменьшается, а увеличивается с высотой около 500 м над уровнем моря. Обычно это происходит в период влажного сезона, после января и февраля [17–19]. Факторы погоды и рельефа местности оказывают большое влияние, вызывая увеличение концентрации пыли. По состоянию на начало декабря 2019 г., с 7 до 14, почти 7 дней подряд, содержание пыли в г. Ханое увеличивалось после заката более чем на  $200 \text{ мг/м}^3$ , в некоторых местах свыше  $300 \text{ мг/м}^3$ <sup>10</sup>.

Поэтому найти эффективные решения непросто, многие решения должны быть реализованы синхронно. В частности, градостроительное решение, тесно связанное с городским управлением и градостроительством, является одним из ведущих важных решений (табл. 3).

<sup>10</sup> Hùng V. Hà Nội vẫn là đô thị có mức độ ô nhiễm bụi mịn PM2.5 cao nhất // Đầu tư online. 2020. <https://baodautu.vn/> (Хунг Во. Ханой по-прежнему является городом с самым высоким уровнем загрязнения мелкой пылью PM2,5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема загрязнения PM2.5 во Вьетнаме стоит очень остро, потому что это серьезно угрожает здоровью населения. По сравнению с развитыми странами, исследования PM2.5 во Вьетнаме все еще не производятся в должном объеме.

Сегодня во Вьетнаме, как и во всем мире, признается важность преобразования и улучшения инфраструктуры.

В данном исследовании оценивалась текущая ситуация загрязнения окружающей среды PM2.5 в г. Ханой во Вьетнаме в процессе урбанизации и ее влияние на социально-экономическое развитие города.

Таким образом, во-первых, в общенациональном масштабе влияние городской среды на концентрацию PM2.5 в основном зависит от количества и плотности городского населения; во-вторых, коэффициент концентрации PM2.5 в городских районах постепенно меняется в зависимости от плотности населения. Компактные поселения имеют тенденцию быть полезными для снижения концентрации PM2.5 в больших популяциях.

Город Ханой в настоящее время сталкивается с рядом проблем в естественной экологической среде из-за быстрой урбанизации и быстрой индустриализации.

В то же время устойчивое экономическое и социальное развитие является важной задачей для правительства Вьетнама.

Как показано в этом исследовании, мы решительно поддерживаем тот факт, что проектирование современной инфраструктуры с помощью городского планирования и пространственной оптимизации является одним из идеальных способов снижения уровня PM2.5 в Ханое.

Поэтому наши выводы могут иметь некоторые теоретические последствия и могут быть полезны для правительства:

- расширение городской застройки в Ханое может напрямую создать большой спрос на энергию и уменьшить поглощение пыли, что приводит к значительным выбросам PM2.5. Таким образом, Ханой должен контролировать выбросы в атмосферу;
- необходимо избегать устаревших подходов к формированию городской застройки и вместо этого отдавать предпочтение компактным городским моделям, поскольку было показано, что неравномерность застройки в городах оказывает существенное влияние на концентрацию PM2.5.

В статье обсуждались последствия загрязнения окружающей среды, вызванного мелкой пылью PM2.5 в процессе урбанизации в г. Ханой, и некоторые решения городского планирования для уменьшения степени загрязнения.

Табл. 3. Решения по снижению загрязнения окружающей среды г. Ханой [20, 21]  
 Table 3. Solutions for environmental pollution reduction in Hanoi [20, 21]

№ No.	Городские районы Urban districts	Земля Land		Численность населения Population		Решения по снижению загрязнения окружающей среды Solutions for environmental pollution reduction
		Земля для городского строительства, га Urban development land, ha	%	Прогноз на 2030 год (тысяча человек) Forecast for 2030 (thousand residents)	%	
I	Центральный городской район Central city district	51 700	56,63	4606	74,07	1. Эффективное использование земельного фонда 1. Efficient land use. 2. Модернизация единой и унифицированной инфраструктуры, особенно транспортной системы 2. Modernization of the unified standard infrastructure with a focus on the transportation system. 3. Перемещение ряда промышленных предприятий, министерств, университетов, колледжей и медицинских учреждений 3. Relocation of several industrial enterprises, ministries, universities, colleges and health care institutions. 4. Расширение и строительство зеленых парков и развлекательных зон 4. Expansion and construction of parks and entertainment areas. 5. Уменьшить чрезмерную концентрацию населения в соответствии с переносимостью. Ограничение строительства многоэтажных жилых домов для увеличения плотности населения 5. Overpopulation reduction in order to match maximal tolerance figures. Restriction of multi-story residential houses to rise population density. 6. Улучшение дренажной системы, минимизация загрязнения воздуха, шума 6. Drainage system improvement, air pollution and noise reduction
II	Городская зона спутника Urban area in a satellite	35 200	38,55	1377	22,14	1. Строительство расчетного коридора — транспортная инфраструктура по модели Eco2 City. 1. Construction of a target-oriented corridor: transport infrastructure will follow the Eco2 City Model 2. Адаптивное сельское хозяйство. 2. Adaptive agriculture 3. Ремонт и строительство изолированных парков и зеленых зон 3. Repair and construction of isolated parks and green areas
III	Площадь городов Urban area	4400	4,82	235,4	3,79	1. Построение макетов Эко Сити и Агро Сити 1. Production of Eco City and Agro City models. 2. Переход от модели естественного производства к модели эко-сельского хозяйства, связанной с малыми ремесленными туристическими услугами. 2. Transition from the natural production model to the eco-agricultural farming model coupled with minor artisan and touristic services. 3. Зонирование урбанизированных деревьев для создания гармоничных переходных пространств, адаптации к современным городским пространствам с системой зеленых насаждений 3. Zoning of urbanized villages aimed at creation of harmonic transition areas, adaptation to contemporary urban environments with a system of green plantations.
	Общее количество Total	91 300	100	6218.4	100	

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Anh L.H., Nam D.T., Luan V.N.* Particulate matter pollution in some cities in Vietnam — Temporal variations and spatial distribution of ambient PM10 and PM2.5 concentrations. North Center for Environmental Monitoring, 2018.
2. *Huong Thu.* Không khí Hà Nội 'bản hạng nhất châu Á'. VnExpress, 2012. URL: <https://vnexpress.net/khong-khi-ha-noi-ban-hang-nhat-chau-a-2226380.html> (Хьюнг Чу. Атмосфера Ханоя «грязная первоклассная в Азии». VnExpress, 2012.)
3. *Đỗ Trần Hải.* Ô nhiễm do quá trình đô thị hóa và phát triển giao thông vận tải trong giai đoạn phát triển công nghiệp hóa, hiện đại hóa // Hội nghị môi trường toàn quốc lần thứ IV, Bộ tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, 29/09/2015. URL: <http://moitruongviet.edu.vn/> (До Тран Хай. Загрязнение вызвано урбанизацией и развитием транспорта на этапе индустриализации и модернизации. // Четвертая национальная экологическая конференция, Министерство природных ресурсов и окружающей среды. Ханой, 29 сентября 2015 г.)
4. *Trịnh Thị Thủy và cộng sự.* Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng nghịch nhiệt đến hàm lượng bụi PM2.5 trong môi trường không khí tại Hà Nội // VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences. 2018. Vol. 34. Issue 3. DOI: 10.25073/2588-1094/vnuees.4289 (Чинь Тхи Тхуй и др. Исследование влияния тепла инверсий на содержание PM2,5 пыли в воздушной среде в Ханое // Научный журнал ВНУ: Науки о Земле и окружающей среде. 2018. Т. 34. № 3.)
5. *Amann M., Klimont Z., An Hà T., Rafaj P., Kiese-wetter G., Nguyen B. et al.* Dự báo chất lượng không khí tại Hà Nội và khu vực phía Bắc Việt Nam. Dự án VAST-IIASA 2018. 2018. URL: [https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/news/Du\\_bao\\_chat\\_luong\\_khong\\_khi\\_Ha\\_Noi\\_VN.pdf](https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/news/Du_bao_chat_luong_khong_khi_Ha_Noi_VN.pdf) (Маркус Аманн (и др.). Прогноз качества воздуха в Ханое и северном регионе Вьетнама. Проект VAST-IIASA 2018. Ханой. 44 с.)
6. *Oanh N.T.K., Phuong M.T.T., Permadi D.A.* Analysis of motorcycle fleet in Hanoi for estimation of air pollution emission and climate mitigation co-benefit of technology implementation // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 59. Pp. 438–448. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.04.057
7. *Hùng T.Đ. et al.* Ứng dụng công nghệ GIS và vệ tinh giám sát thay đổi hàm lượng bụi PM2.5 ở Miền bắc Việt Nam (2000 – 2005–2010). 10 (Хунг Т. Д. и др. Применение ГИС-технологий и спутников для мониторинга изменений содержания пыли PM2,5 на севере Вьетнама (2000–2005–2010 гг.))
8. *Thu Hiền.* Ô nhiễm không khí đô thị — Thực trạng và giải pháp // Tạp chí con số & sự kiện. Hà Nội. 30/8/2019. URL: <http://consosukien.vn/> (Чу Хиен. Загрязнение воздуха в городах — Текущая ситуация и решения // Журнал чисел и событий. Ханой. 30 августа 2019.)
9. *Ngọc Lý.* Sức ép quá tải từ quá trình đô thị hóa tại Việt Nam // Báo Xây dựng. Hà Nội. 11/10/2015. URL: <https://baohaydung.com.vn/> (Нгок Ли. Давление перегрузки от процесса урбанизации во Вьетнаме // Строительная газета. Ханой. 10.11.2015.)
10. *Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K. et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 // The Lancet. 2017. Vol. 389. Issue 10082. Pp. 1907–1918. DOI: 10.1016/s0140-6736(17)30505-6
11. *Yang F., Ma Y., He K.* Research on General Situation of PM2.5 // World Environ. 2000, Vol. 4. Pp 32–35.
12. European Commission. Air Quality Standards. URL: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed on 24 December 2017).
13. *Luong L.M.T., Phung D., Sly P.D., Morawska L., Thai P.K.* The association between particulate air pollution and respiratory admissions among young children in Hanoi, Vietnam // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 578. Pp. 249–255. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.012
14. *Nhung N.T.T., Schindler C., Dien T.M., Probst-Hensch N., Perez L., Künzli N.* Acute effects of ambient air pollution on lower respiratory infections in Hanoi children: An eight-year time series study // Environment International. 2018. Vol. 110. Pp. 139–148. DOI: 10.1016/j.envint.2017.10.024
15. National Environment Agency. Air Quality and Targets. URL: <http://www.nea.gov.sg/anti-pollution-radiation-protection/air-pollution-control/air-quality-and-targets> (accessed: 24 December 2017).
16. *Guo H.* Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong // Atmospheric Environment. 2003. Vol. 37. Issue 38. Pp. 5307–5317. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.011
17. *Beard J.D., Beck C., Graham R., Packham S.C., Traphagan M., Giles R.T. et al.* Winter Temperature Inversions and Emergency Department Visits for Asthma in Salt Lake County, Utah, 2003–2008 // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120. Issue 10. Pp. 1385–1390. DOI: 10.1289/ehp.1104349
18. *Wallace J., Kanaroglou P.* The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO2) and fine particulate matter (PM2.5) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. Issue 18. Pp. 5085–5095. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.050
19. *Hùng Võ.* Hà Nội vẫn là đô thị có mức độ ô nhiễm bụi mịn PM2.5 cao nhất // Báo Đầu tư điện tử. Hà Nội. 24/03/2020. URL: <https://baodautu.vn/> (Хунг Во. Ханой по-прежнему является городом с самым высоким уровнем загрязнения мелкой

пылью PM<sub>2,5</sub> // Электронная инвестиционная газета. Ханой. 24 марта 2020 г.)

20. *Trần Trọng Hanh*. Quy hoạch vùng, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2015. (Чан Тронг Хан. Региональное планирование. Ханой : Строительство Издательство, 2015.)

21. *Trần Trọng Hanh*. Tiếp cận mô hình định cư bền vững vùng Đồng bằng sông Cửu Long thích ứng với biến đổi khí hậu, Hội thảo khoa học Cần Thơ — 2016. (Чан Тронг Хан. Подход к моделям устойчивого заселения в дельте Меконга, адаптируясь к изменению климата // Сборник конференции на научной семинаре Can Tho — 2016.)

Поступила в редакцию 11 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

О Б АВТОРАХ: **Фан Тхи Ан** — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru;

**Илхомжон Садриевич Шукуров** — доктор технических наук, доцент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 630748; grado@mgsu.ru;

**Фам Ван Лыонг** — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 973261, ORCID: 0000-0003-4929-7442; luongpv@nuce.edu.vn;

**Лола Ильхомовна Шукурова** — магистр; **Самаркандский государственный архитектурно-строительный институт**; 140100, г. Самарканд, ул. Лялязар, д. 70, Узбекистан; shukurovalola@yandex.com.

## REFERENCES

1. Anh L.H., Nam D.T., Luan V.N. *Particulate matter pollution in some cities in Vietnam — Temporal variations and spatial distribution of ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations*. North Center for Environmental Monitoring, 2018.

2. Hương Thu. *Không khí Hà Nội 'bẩn hạng nhất châu Á'*. VnExpress, 2012. URL: <https://vnexpress.net/khong-khi-ha-noi-ban-hang-nhat-chau-a-2226380.html> (Huong Thu. Hanoi's atmosphere is “dirty first-class in Asia”. VnExpress, 2012.) (vnm.).

3. Đỗ Trần Hải. *Ô nhiễm do quá trình đô thị hóa và phát triển giao thông vận tải trong giai đoạn phát triển công nghiệp hóa, hiện đại hóa*. Hội nghị môi trường toàn quốc lần thứ IV, Bộ tài nguyên và Môi trường. Hà Nội, 29/09/2015. URL: <http://moitruongviet.edu.vn/> (Do Tran Hai. Pollution is caused by the urbanization and development of transportation in the stage of industrialization and modernization. Fourth National Environmental Conference, Ministry of Natural Resources and Environment. Hanoi, September 29, 2015). (vnm.).

4. Trịnh Thị Thủy và cộng sự. *Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng nghịch nhiệt đến hàm lượng bụi PM<sub>2.5</sub> trong môi trường không khí tại Hà Nội*. VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences. 2018; 34(3). DOI: 10.25073/2588-1094/vnuces.4289(Trinh Thi Thuy et al. Researching the effect of inverse temperature phenomena on PM<sub>2.5</sub> dust concentration in the air environment in Hanoi. VNU Science Journal: Earth and Environment Sciences, Volume 34, No.3. 2018) (vnm.).

5. Amann M., Klimont Z., An Hà T., Rafaj P., Kiesewetter G., Nguyen B. et al. *Dự báo chất lượng không khí tại Hà Nội và khu vực phía Bắc Việt Nam*. Dự án VAST-IIASA 2018. 2018. URL: [https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/news/Du\\_bao\\_chat\\_luong\\_khong\\_khi\\_Ha\\_Noi\\_VN.pdf](https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/news/Du_bao_chat_luong_khong_khi_Ha_Noi_VN.pdf) (Markus Amann et al. Forecast of air quality in Hanoi and the Northern region of Vietnam. Project VAST-IIASA 2018. Hanoi, 44.) (vnm.).

6. Oanh N.T.K., Phuong M.T.T., Permadi D.A. Analysis of motorcycle fleet in Hanoi for estimation of air pollution emission and climate mitigation co-benefit of technology implementation. *Atmospheric Environment*. 2012; 59:438-448. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.04.057

7. Hùng T.Đ. et al. *Ứng dụng công nghệ Gis và vệ tinh giám sát thay đổi hàm lượng bụi PM<sub>2.5</sub> ở Miền bắc Việt Nam (2000–2005–2010)*. (Hung T.Đ. et al. Application of GIS technology and monitoring satellite for PM<sub>2.5</sub> dust content changes in the North of Vietnam (2000–2005–2010).) (vnm.).

8. Thu Hiền. *Ô nhiễm không khí đô thị — Thực trạng và giải pháp*. Tạp chí con số & sự kiện. Hà Nội. 30/8/2019. URL: <http://consosukien.vn/> (Thu Hien. Urban air pollution — Current situation and solutions. Journal of numbers & events. Hanoi. August 30, 2019). (vnm.).

9. Ngọc Lý. *Sức ép quá tải từ quá trình đô thị hóa tại Việt Nam*. Báo Xây dựng. Hà Nội. 11/10/2015. URL: <https://baoxaydung.com.vn/> (Ngoc Ly. Overpressure

from urbanization in Vietnam. *Construction Newspaper*. Hanoi. 11/10/2015). (vnm.).

10. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*. 2017; 389(10082):1907-1918 DOI: 10.1016/s0140-6736(17)30505-6

11. Yang F., Ma Y., He K. *Research on General Situation of PM2.5*. World Environ. 2000; 4:32-35.

12. European Commission. *Air Quality Standards*. URL: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed: 24 December 2017).

13. Luong L.M.T., Phung D., Sly P.D., Morawska L., Thai P.K. The association between particulate air pollution and respiratory admissions among young children in Hanoi, Vietnam. *Science of The Total Environment*. 2017; 578:249-255. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.012

14. Nhung N.T.T., Schindler C., Dien T.M., Probst-Hensch N., Perez L., Künzli N. Acute effects of ambient air pollution on lower respiratory infections in Hanoi children: An eight-year time series study. *Environment International*. 2018; 110:139-148. DOI: 10.1016/j.envint.2017.10.024

15. National Environment Agency. *Air Quality and Targets*. URL: <http://www.nea.gov.sg/anti-pollution-radiation-protection/air-pollution-control/air-quality-and-targets> (accessed on 24 December 2017).

16. Guo H. Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong. *Atmospheric Environment*. 2003; 37(38):5307-5317. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.011

17. Beard J.D., Beck C., Graham R., Packham S.C., Traphagan M., Giles R.T. et al. Winter Temperature Inversions and Emergency Department Visits for Asthma in Salt Lake County, Utah, 2003–2008. *Environmental Health Perspectives*. 2012; 120(10):1385-1390. DOI: 10.1289/ehp.1104349

18. Wallace J., Kanaroglou P. The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Science of the Total Environment*. 2009; 407(18):5085-5095. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.050

19. Hùng Võ. *Hà Nội vẫn là đô thị có mức độ ô nhiễm bụi mịn PM 2,5 cao nhất. Đầu tư online*. 2020. URL: <https://baodautu.vn/> (Hung Vo. Hanoi is still the city with the highest level of PM 2,5 fine dust pollution. Invest online. 2020). (vnm.).

20. Trần Trọng Hanh. *Quy hoạch vùng, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2015*. (Tran T. H., Regional Planning. Construction Publishing, Hanoi, 2015.) (vnm.).

21. Trần Trọng Hanh. *Tiếp cận mô hình định cư bền vững vùng Đồng bằng sông Cửu Long thích ứng với biến đổi khí hậu, Hội thảo khoa học Cần Thơ, 2016*. (Tran T. H. Sustainable settlement model adaptation in the Mekong Delta, adapting to climate change. Conference proceeding at Scientific Workshop of Can Tho, 2016.) (vnm.).

Received July 11, 2020

Adopted in revised form on September 28, 2020

Approved for publication on October 30, 2020.

**B I O N O T E S:** **Phan Thi An** — postgraduate student of the Department of urban planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

**Ilkhomzhon S. Shukurov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 630748; grado@mgsu.ru;

**Pham Van Luong** — postgraduate student of the Department of Ventilation and Heat and Gas supply; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 973261, ORCID: 0000-0003-4929-7442; luongpv@nuce.edu.vn;

**Lola I. Shukurova** — master; **Samarkand State Institute Architecture and Civil Engineering**; 70 Lyalazar st., Samarkand, 140100, Uzbekistan; shukurovalola@yandex.com.

## Инженерная защита зданий, сооружений и территорий как фактор инновационного развития территориального планирования

П.А. Журавлев<sup>1</sup>, А.М. Марукян<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ»; г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для формирования современной комфортной городской среды необходима разработка комплексной (пространственной) организации территории. Важными составляющими в комплексной (пространственной) организации территории являются инженерная защита зданий, сооружений и территорий, обеспечивающая реализацию инфраструктурного строительства, органичное размещение строительных объектов в экосистеме с сохранением ее природных взаимосвязей, защита построенных или строящихся объектов от опасных природных воздействий, а также защита населения от риска возникновения возможных последствий внедрения в экосистему в результате нарушения природных процессов в ходе строительства.

**Материалы и методы.** Рассмотрено действующее законодательство о градостроительной деятельности, согласно которому закреплён принцип эффективного использования территории, осуществляемый в виде деятельности по подготовке и утверждению документации по планировке территории для размещения объектов капитального строительства, инженерной инфраструктуры, а также по архитектурно-строительному проектированию, строительству, реконструкции указанных объектов. Отмечено, что обоснование проекта планировки территории включает материалы о выполняемых мероприятиях по защите территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также схемы инженерной подготовки и инженерной защиты территории. Проведен анализ статистических данных, основных причин, факторов, требующих учета и влияющих на комплексное (пространственное) развитие территорий будущего строительства.

**Результаты.** Приведен перечень мероприятий инженерной подготовки территорий, обеспечивающий создание благоприятных условий для строительства и эксплуатации населенных пунктов, размещения и возведения зданий, прокладки улиц, инженерных сетей и других элементов градостроительства. Определен состав мероприятий и сооружений инженерной защиты территорий зданий и сооружений на этапах территориального планирования и проектирования.

**Выводы.** Формализованы принципы (условия), в соответствии с которыми осуществляется принятие организационно-технологических решений по устройству инженерной защиты на этапах территориального планирования и проектирования. На основании указанных принципов сформулирован вывод о необходимости комплексного подхода к устройству инженерной защиты, требующего подготовки схемы инженерной защиты, включающей генеральные, детальные и специальные схемы с целью вариативной проработки проектных решений, оптимизации проектирования, оценки предотвращенного ущерба, обоснования инвестиций и предварительного расчета укрупненной ориентировочной стоимости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инженерная защита зданий и территорий, мероприятия и сооружения инженерной защиты территорий, зданий и сооружений, территориальное планирование, пространственное развитие территорий, планировочные ограничения, природные и техногенные факторы

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Журавлев П.А., Марукян А.М. Инженерная защита зданий, сооружений и территорий как фактор инновационного развития территориального планирования // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1440–1449. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1440-1449

## Engineering protection of buildings, structures and territories as a factor of innovative development of spatial planning

Pavel A. Zhuravlev<sup>1</sup>, Artur M. Marukyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Stroygazmontazh LLC; Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** A comfortable modern urban environment requires integrated spatial planning. An important constituent of integrated spatial planning is the engineering protection of buildings, structures and territories that ensures infrastructural development, natural positioning of construction facilities in ecosystems to preserve their natural relationships; protection of completed or constructed facilities from natural hazards, as well as protection of the population from the consequences of disruption into the ecosystem's natural processes in the course of construction.

**Materials and methods.** Current legislation on urban planning, according to which the principle of effective use of territories is established, is considered. This principle is implemented through preparation and approval of spatial planning documentation that governs the positioning of capital construction facilities, the engineering infrastructure, as well as architectural and structural design, construction and reconstruction. It is noteworthy that the substantiation of a spatial planning project includes materials on activities performed to protect a territory from natural and man-made emergencies, as well as land development and engineering protection plans. The co-authors have analyzed statistical data, main reasons and factors affecting the integrated spatial development of territories that will accommodate construction projects and need to be taken into account.

**Results.** The co-authors provide a list of land development actions that ensure the best environment for the construction and operation of populated localities, siting and erection of buildings, street laying, construction of engineering networks and other elements of urban development. The co-authors compiled lists of engineering protection actions and appliances required to protect buildings and structures at the stages of spatial planning and design.

**Conclusions.** The co-authors have formulated principles (conditions) that govern administrative and engineering decision making in terms of engineering protection at the stages of spatial planning and project design. These principles substantiate the conclusion about the need for an integrated approach to engineering protection that encompasses preparation of an engineering protection pattern, including master, in-detail and specialized plans to ensure adjustable project solutions, design optimization, assessment of any prevented damages, substantiation of investments and preliminary calculation of consolidated approximate costs.

**KEYWORDS:** engineering protection of structures and territories, engineering protection actions and structures, buildings and structures, spatial planning, spatial development of territories, planning restrictions, natural and anthropogenic factors

**FOR CITATION:** Zhuravlev P.A., Marukyan A.M. Engineering protection of buildings, structures and territories as a factor of innovative development of spatial planning. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1440-1449. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1440-1449 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Благополучие основной доли населения России и успешность развития национальной экономики напрямую связаны с качеством среды в городах и населенных пунктах. Более половины жителей России (64 %) сталкиваются с нехваткой объектов общественно-деловой инфраструктуры в пешей доступности от дома. Для 70 % территорий жилых районов России, сформированных как в советский период, так и в современных условиях, характерна низкая обеспеченность объектами торговой и культурно-досуговой инфраструктуры. Более половины жителей средних и крупных городов России сталкиваются с проблемами низкой транспортной доступности городских территорий, заторами на дорогах, дефицитом автопарковок.

Около 20 % населения России проживают в стесненных условиях и нуждаются в увеличении жилой площади. Особо отмечается нехватка парков, скверов, низкое качество озеленения рядом с домом, неблагоприятная экологическая обстановка, шумовые и атмосферные загрязнения. Как следствие, формирование качественной городской среды должно повлиять на решение указанных проблем, с которыми сталкиваются большинство жителей России в повседневной жизни.

Проблему формирования качественной жилой среды, определяемую не только ее непосредственными физическими, функциональными и эстетическими характеристиками, невозможно решить без учета взаимосвязи с пространственным окружением, динамикой взаимодействия с окружающей природной средой [1–3].

Гипотеза данного исследования заключается в усмотрении комплексного взаимовлияния (взаимосвязи) состояний, характеристик и путей разви-

тия природных территорий при формировании качественной жилой среды.

Задача исследования заключается в определении требований (мероприятий), предъявляемых к пространственному развитию территорий на этапах градостроительного планирования и проектирования, без которых невозможно ее развитие.

Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г., утвержденная распоряжением правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 207-р, разработана в целях обеспечения устойчивого и сбалансированного пространственного развития Российской Федерации, направленного на сокращение межрегиональных различий в уровне и качестве жизни населения, ускорение темпов экономического роста и технологического развития, а также на обеспечение национальной безопасности страны.

Реализация основных целей национального проекта «Жилье и городская среда», заключающихся в обеспечении эффективного использования земель, увеличении объема жилищного строительства, обеспечении доступным жильем, комплексном развитии городов и населенных пунктов, кардинальном повышении комфортности городской среды, увеличении устойчивого сокращения непригодного для проживания жилищного фонда, влечет за собой увеличение строительного производства.

Реализация основных целей национального проекта возможна при соблюдении инженерно-строительной безопасности [4] как на уже застроенных территориях, с учетом характера рельефа местности, уклонов (специфики организации планировочной композиции уличной сети, поверхностного стока ливневых вод), особенностей зданий и сооружений, находящихся в непосредственной

близости друг от друга (необходимость укрепления оснований и фундаментов), так и при освоении новых территорий, в том числе на местностях, характеризующихся специфическими природными процессами (обвалы, подтопляемые и затопляемые территории, оползни, карсты, сели, овраги и т.д.), способными нанести ущерб. Опасные природные процессы и явления могут возникать как сами по себе, так и в результате воздействия человека на окружающую среду путем нарушения ее естественных процессов и взаимосвязей. Таким образом, основными категориями опасных явлений могут выступать как экологические, транспортно-планировочные, функционально-планировочные, так и природные факторы, которые негативно воздействуют на здоровье и безопасность населения.

Значительное количество природных явлений можно было бы предупредить путем своевременного осуществления соответствующих инженерных мероприятий, что позволяет значительно уменьшить расходы по сравнению с затратами на ликвидацию вредных последствий.

Таким образом, комплекс мероприятий инженерной защиты зданий, сооружений и территорий занимает важное место в условиях развития городской среды, является неотъемлемой частью работ, выполняемых при реализации инфраструктурных проектов, и при формировании пространственного развития территорий приобретает сложную структуру, охватывающую ведущие направления развития (социально-экономические, экологические, инвестиционные) [5, 6].

В этой связи важными составляющими в комплексной (пространственной) организации территории являются инженерная защита зданий и территории, обеспечивающая реализацию инфраструктурного строительства, органичное размещение строительных объектов в экосистеме с сохранением ее природных взаимосвязей, защита построенных или строящихся объектов от опасных природных воздействий, а также защита населения от риска возникновения возможных последствий внедрения в экосистему в результате нарушения природных процессов в ходе строительства.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель работы — на основании нормативных и правовых требований действующего законодательства сформулировать принципы (условия), в соответствии с которыми осуществляется принятие организационно-технологических решений по устройству инженерной защиты на этапах территориального планирования и проектирования.

Градостроительным кодексом Российской Федерации определено понятие «деятельность по комплексному и устойчивому развитию территорий», согласно которому в целях обеспечения наиболее

эффективного использования территории осуществляется деятельность по подготовке и утверждению документации по планировке территории для размещения объектов капитального строительства жилого, производственного, общественно-делового и иного назначения и необходимых для функционирования таких объектов и обеспечения жизнедеятельности граждан объектов коммунальной, транспортной, социальной инфраструктур, а также по архитектурно-строительному проектированию, строительству, реконструкции указанных объектов.

Подготовка проектов планировки территории осуществляется для выделения элементов планировочной структуры (района, микрорайона, квартала, территории общего пользования, транспортно-пересадочного узла, территории, занятой линейным объектом, улично-дорожной сети), установления границ территорий общего пользования, границ зон планируемого размещения объектов капитального строительства, определения характеристик и очередности планируемого развития территории.

Следует отметить, что важнейшими элементами в составе материалов по обоснованию проекта планировки территории являются:

- перечень мероприятий по защите территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- схема вертикальной планировки территории, инженерной подготовки и инженерной защиты территории.

Разработка градостроительных и технических решений с учетом условий безопасности и благоприятных условий жизнедеятельности человека, ограничения негативного воздействия хозяйственной и другой деятельности на окружающую среду и обеспечения охраны и рационального использования природных ресурсов обеспечит комплексное и устойчивое развитие той или иной территории в интересах населения.

Современные требования проектирования учитывают оценку воздействия на окружающую среду техногенных нагрузок, однако градостроительные решения, принятые без учета динамики свойств территории, только на основе социально-градостроительных, технико-экономических и экологических требований, приведут к противоречию с используемым природно-территориальным ресурсом [7–12].

Достаточно распространенным негативным проявлением антропогенного воздействия на природную среду, характеризующимся значительным распространением, длительностью и масштабом наносимых потерь, является подтопление селитебных территорий. Можно выделить следующие основные причины возникновения подтопления: повышение уровня грунтовых вод, отсутствие ливневой канализации в населенных пунктах, а также бесконтрольное нарушение ландшафта, рост урбанизации и застройки, сопровождающийся увеличе-

нием водонепроницаемых покрытий, являющихся причиной максимального стока в городах [13–15].

Помимо указанных выше воздействий, развитие территорий находится под влиянием опасных природных явлений (ОЯ) и неблагоприятных условий погоды (НУП).

К примеру, по данным Федеральной службы государственной статистики, в период с 2010 по 2018 гг. от общего числа природных чрезвычайных ситуаций, прошедших на территории Российской Федерации, опасные гидрологические явления и сильные дожди, снегопады, крупный град занимают более одной трети (33,73 %) и составляют 16,72 и 17,01 % соответственно, уступая лишь крупным природным пожарам (28,85 %), а также заморозкам и засухе (19,53 %), суммарно составляющим 48,38 %.

По данным [14, 16–19] наибольшим воздействиям насыщенных влагой воздушных масс подверглись территории Дальневосточного, Южного федеральных округов, Иркутской области. Районы с наибольшим риском сильных ливней, дождей сосредоточены на территориях, где высокая интенсивность осадков сочетается с большой плотностью населения и хозяйственных субъектов.

Авторами [20] приводятся результаты анализа данных за период 1991–2017 гг. об изменениях частоты опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений природы, распределяемые по линейной зависимости с явным ростом частоты явлений по мере продолжения ряда наблюдений. В исследовании отмечается рост тенденции изменения опасных гидрометеорологических явлений погоды, влияющих на наносимый ущерб отдельным отраслям экономики, а также населению. Среди рассматриваемых отраслей (сельское хозяйство, электроэнергетика, предприятия автотранспортной отрасли, жилищно-коммунальное хозяйство) отмечается явный растущий тренд нанесения ущерба жилищно-коммунальному хозяйству (включая линейную инфраструктуру).

Авторами [21] по результатам анализа данных опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) и неблагоприятных условий погоды предложены показатели оценки интенсивности воздействия на социальную и экономическую системы России. Первый показатель характеризует влияние повторяемости ОЯ и НУП на конкретной территории на плотность населения рассматриваемой территории. Второй показатель характеризует влияние среднегодовой плотности ОЯ и НУП на валовый региональный продукт, тем самым являясь оценкой воздействия на экономическую составляющую.

С точки зрения интенсивности воздействия ОЯ и НУП на социально-экономическую систему наиболее неблагоприятным экономическим районом является Северо-Кавказский регион. По другим субъектам РФ, где опасность по воздействию на население наиболее велика, отмечаются Москва и Мо-

сковская область, Самарская область и Республика Татарстан.

Примером трагического влияния ОЯ и НУП на социально-экономическую систему районов являются произошедшие в 2019 г. катастрофические затопления населенных пунктов Иркутской области, в результате которых погибло 25 человек, было подтоплено более 160 населенных пунктов, затоплено более 10 000 домов, большая часть которых не подлежит восстановлению. Экономический ущерб оценивается более чем 35 млрд руб. Ранее в 2013 г. произошло не менее масштабное катастрофическое наводнение в Амурской, Магаданской областях, Республике Саха (Якутия), Приморском и Хабаровском краях, а также в Еврейской автономной области с сопоставимым экономическим ущербом.

Следует отметить публикации ряда авторов<sup>1</sup> [22–26], свидетельствующие о том, что техногенное воздействие усиливает негативное влияние неблагоприятных гидрологических явлений на активность оползней и селей (на примере территории Большого Сочи, правобережья р. Волги в районе г. Ульяновска, Волгоградского правобережья р. Волги). Авторами приводятся следующие основные виды техногенных воздействий: несанкционированное складирование отвалов грунта на склонах, подрезка склонов при строительстве объектов олимпийской инфраструктуры, неконтролируемое перераспределение поверхностного и подземного стока, строительное освоение прибрежной (склоновой) территории. Как следствие, возрастающая техногенная нагрузка на склоны, низкая естественная (природная) устойчивость территории (снижение прочностных характеристик грунтов) провоцируют под воздействием гидрологических явлений деформацию грунтов, что приводит к опасным негативным последствиям для человека, объектов хозяйства и окружающей среды.

Таким образом, комплексное развитие территорий находится в зависимости от большого количества факторов и требует учета:

- географических, метеорологических, сейсмических особенностей территории России;
- рельефа местности и условий гидрографии (конфигурации водоемов);
- планировочных ограничений (подтопляемые территории или территории, на которых могут возникнуть неравномерное оседание земной поверхности и сдвиг грунта, в результате подвергшегося воздействию подземных горных работ);
- неоднородностей и разнообразия природно-климатических, ландшафтных, геокриологических, геологических, гидрогеологических условий;
- воздействий техногенного характера.

<sup>1</sup> Латыпова В.З., Мухаметшин Ф.Ф., Горикова А.Т. Оползень в г. Ульяновск 05.04.2016 как классический пример техногенной катастрофы природно-техногенной системы правобережья р. Волга. URL: <http://ulpressa.ru/2016/04/20/809050>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Любому строительству (объекта или комплекса объектов) предшествует подготовка площадки, направленная на обеспечение необходимых условий качественного и своевременного возведения зданий и сооружений, включающая инженерную подготовку и инженерное обеспечение.

Инженерная подготовка представляет собой комплекс мероприятий, обеспечивающих создание благоприятных условий для строительства и эксплуатации населенных пунктов, размещения и возведения зданий, прокладки улиц, инженерных сетей и других элементов градостроительства, с обязательным учетом экологических требований.

В состав инженерной подготовки территории населенных пунктов входят следующие мероприятия:

- вертикальная планировка поверхности земли, обеспечивающая наиболее целесообразные и экономичные условия для вертикальной посадки зданий и сооружений на местности, отвода дождевых и талых вод к местам сброса в водоочистные сооружения и водоемы;
- создание необходимых продольных уклонов улицам и дорогам для движения автомобилей и пешеходов, а также для прокладки подземных инженерных сетей безнапорной канализации и дренажа;
- защита территории от затопления во время паводков, понижение уровня грунтовых вод на участках с повышенным их уровнем, осушение заболоченных участков, а также противопожарные и противоселевые мероприятия, в засушливых районах — обводнение и орошение территории;
- борьба с оврагообразованием и размывом оврагов;
- восстановление участков территории, нарушенных в результате человеческой деятельности (отвалы отходов, отработанные карьеры и др.).

Опасные процессы и явления, которые могут развиваться на территории будущего строительства, формируемые под воздействием вышеуказанных факторов, обуславливают необходимость их детального изучения, прогнозирования и оценки рисков, а также разработку мероприятий по инженерной защите как территорий, так и зданий и сооружений от опасных процессов.

Инженерная защита территории всегда являлась неотъемлемой частью работ, выполняемых при реализации инфраструктурных объектов, и при этом сравнительно недавно стала выделяться в отдельный масштабный раздел проектной документации, выполняя градо- и объектоформирующую роль.

Необходимость инженерной защиты территории от чрезвычайных ситуаций природного характера, вызванных опасными природными процессами и явлениями, определяется в соответствии с положениями Градостроительного кодекса в части

градостроительного планирования развития территорий субъектов Российской Федерации, городов и сельских поселений с учетом оценки риска опасных геологических процессов:

- для вновь застраиваемых и реконструируемых территорий — в проекте генерального плана с учетом вариантности планировочных и технических решений;
- для застроенных территорий — в проектах строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений с учетом существующих планировочных решений и требований заказчика.

При проектировании инженерной защиты территории от затопления и подтопления надлежит разрабатывать комплекс мероприятий, обеспечивающих предотвращение затопления и подтопления территорий в зависимости от требований их функционального использования и охраны природной среды или устранение отрицательных воздействий затопления и подтопления.

Система инженерной защиты от подтопления должна быть территориально единой, объединяющей все локальные системы отдельных участков и объектов. При этом она должна быть увязана с генеральными планами и территориальными комплексными схемами градостроительного планирования.

Мероприятия по инженерной защите следует проектировать комплексно с учетом прогноза изменения окружающей среды в связи с постройкой сооружений инженерной защиты и освоением территорий.

Выбор мероприятий и сооружений инженерной защиты следует проводить с учетом видов возможных деформаций и воздействий, уровня ответственности и стоимости защищаемых территорий, зданий и сооружений, их конструктивных и эксплуатационных особенностей.

Разработка проектов планировки и застройки городских и сельских муниципальных образований на территории Российской Федерации осуществляется с учетом требований, приведенных в СП 42.13330.2016. При разработке проектов следует предусматривать, при необходимости, инженерную защиту от затопления, подтопления, селевых потоков, снежных лавин, оползней и обвалов.

Отвод поверхностных вод следует осуществлять, предусматривая в городах дождевую канализацию закрытого типа с предварительной очисткой стока. Применение открытых водоотводящих устройств — канав, кюветов, лотков — допускается в районах одно-двухэтажной застройки и в сельских поселениях, а также на территории парков с устройством мостиков или труб на пересечении с улицами, дорогами, проездами и тротуарами.

На территории поселений с высоким стоянием грунтовых вод, на заболоченных участках следует

предусматривать понижение уровня грунтовых вод в зоне капитальной застройки путем устройства закрытых дренажей.

Территории поселений, расположенных на прибрежных участках, должны быть защищены от затопления паводковыми водами, ветровым нагоном воды; от подтопления грунтовыми водами — подсыпкой (намывом) или обвалованием.

Для защиты существующей застройки в селеопасной зоне необходимо предусматривать максимальное сохранение леса, посадку древесно-кустарниковой растительности, террасирование склонов, укрепление берегов селеносных рек, сооружение плотин и запруд в зоне формирования села, строительство селенаправляющих дамб и отводящих каналов на конусе выноса.

В городских и сельских поселениях, расположенных на территориях, подверженных оползневым процессам, необходимо предусматривать упорядочение поверхностного стока, перехват потоков грунтовых вод, предохранение естественного контрфорса оползневого массива от разрушения, повышение устойчивости откоса механическими и физико-химическими средствами, террасирование склонов, посадку зеленых насаждений.

Противооползневые мероприятия следует осуществлять на основе комплексного изучения геологических и гидрогеологических условий районов.

При планировке и застройке поселений следует выполнять требования по обеспечению экологической безопасности и охраны здоровья населения, предусматривать мероприятия по охране природы, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов, оздоровлению окружающей среды. На территории поселений необходимо обеспечивать достижение нормативных требований и стандартов, определяющих качество атмосферного воздуха, воды, почв, а также допустимых уровней шума, вибрации, электромагнитных излучений, радиации и других факторов природного и техногенного происхождения.

Согласно СП 104.13330.2016, защиту территорий от затопления следует осуществлять следующими средствами:

- обвалованием территорий со стороны реки, водохранилища или другого водного объекта. Схему обвалования защищаемой территории следует выбирать на основании технико-экономического сопоставления вариантов с учетом требований нормативных документов;
- искусственным повышением рельефа территории до незатопляемых планировочных отметок. Это мероприятие следует выполнять для осветнения под застройку затопленных, временно затапливаемых и подтопленных территорий;
- аккумуляцией, регулированием, отводом поверхностных сбросных и дренажных вод с затопленных, временно затопляемых и низинных нарушен-

ных земель. При этом сооружения, регулирующие поверхностный сток на защищаемых от затопления территориях, следует проектировать с учетом расчетного расхода поверхностных вод, поступающих на эти территории (дождевые и талые воды, временные и постоянные водотоки), принимаемого в соответствии с классом защитного сооружения.

При проектировании инженерной защиты селитебных территорий в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов следует учитывать отепляющее воздействие застройки поселков и городов, уменьшение испаряемости с поверхности застроенных участков и дорог, повышение снегозащитности, значительное растепляющее и обводняющее воздействие тепловых коммуникаций и коллекторов инженерных сетей, водопроводов и канализации, вызывающих деформации оснований и фундаментов.

Системы инженерной защиты следует проектировать с учетом особенностей природоохранных, санитарно-гигиенических и противопаразитарных требований для каждой природной зоны, а также данных территориальных комплексных схем охраны природы.

Для защиты территорий от подтопления следует применять:

- дренажные системы;
- противодиффузионные экраны и завесы;
- вертикальную планировку территории с организацией поверхностного стока, прочистку открытых водотоков и других элементов естественного дренирования и регулирование уровня режима водных объектов.

Состав защитных сооружений на подтопленных территориях следует назначать в зависимости от характера подтопления (постоянного, сезонного, эпизодического) и величины приносимого им ущерба.

Для инженерной защиты территории, а также зданий и сооружений от опасных процессов применяется широкий перечень мероприятий и технических средств:

- организация и регулирование поверхностного стока;
- берегоукрепление и благоустройство береговых склонов;
- закрепление и благоустройство овражных территорий;
- заградительные системы водозащиты: нагорные каналы, головные, береговые дренажи, противодиффузионные завесы;
- систематические горизонтальные дренажи;
- локальные защитные системы — дренажи (кольцевые, пластовые, пристенные), гидроизоляция, защитные экраны, противодиффузионные завесы;
- вертикальные скважины и специальные дренажи: комбинированные, вакуумные, вентиляционные, пневмонагнетательные;

- мероприятия по защите от оползневых процессов: изменение рельефа местности, изменение русел, дренирование, перераспределение и укрепление грунта, строительство регулирующих сооружений, строительство защитных сооружений;
- удерживающие сооружения: подпорные стены (на естественном или свайном основании), включая конструкции из армированного грунта, свайные конструкции и столбы, анкерные и нагельные крепления, поддерживающие стены, контрфорсы, опояски (упорные пояса), габионы, армированный грунт;
- улавливающие сооружения: стены, сетки, валы, траншеи, полки с бордюрными стенами, надолбы;
- противообвалы галереи;
- агролесомелиорация, защитные покрытия и закрепление грунтов;
- противоселевые сооружения и мероприятия: селезадерживающие сооружения (плотины), селепропускные сооружения (каналы, селеспуски), селенаправляющие сооружения, склоновые стабилизирующие сооружения (подпорные стены и дренажные устройства) и русловые стабилизирующие сооружения (запруды);
- заполнение (тампонаж) карстующихся отложений при проявления карстово-суффозионных процессов (при проектировании тоннелей);
- комплекс мероприятий по локализации возможных деформаций окружающей застройки вдоль трасс тоннеля: конструктивные мероприятия (например, закрепление грунтов) и технологические мероприятия (опережающая временная крепь при горных способах, механизированные щиты с ограждением лба забоя и уплотнением строительного зазора, метод «стена в грунте» при открытых способах, стабилизация грунтового массива и др.);
- технические меры инженерной защиты территории над строящимся тоннелем: компенсационный долив воды в грунт при водопонижении, искусственное оттаивание грунта при замораживании, предотвращение загрязнения подземных и поверхностных вод вредными веществами при химическом укреплении грунтов, уплотнительное или компенсационное нагнетание в грунт стабилизирующих составов и другие меры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Организация и устройство инженерной защиты зданий, сооружений и территорий как фактор развития территориального планирования осуществляются как при формировании документации территориального планирования, так и в процессе архитектурного проектирования с учетом требований и регламентов к разработке проектной документации. Инженерная защита включает мероприятия и сооружения, планируемые и осуществляемые на этапах подготовки строительной площадки, проведения строительно-монтажных работ и при эксплуатации построенных объектов капитального строительства. Инженерная защита обеспечивает безопасную эксплуатацию объектов, территории и защиту граждан от всех видов опасных естественных и техногенных природных явлений и геологических процессов.

В этой связи важными составляющими в комплексной (пространственной) организации территории являются инженерная защита зданий, сооружений и территории, обеспечивающая реализацию инфраструктурного строительства, органичное размещение строительных объектов в экосистеме с сохранением ее природных взаимосвязей, защита построенных или строящихся объектов от опасных природных воздействий, а также защита населения от риска возникновения возможных последствий внедрения в экосистему в результате нарушения природных процессов в ходе строительства.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что создание инженерной защиты зданий, сооружений и территории имеет важное значение при реализации инфраструктурного строительства и требует комплексного подхода. При этом в основу ее создания должна быть положена принципиальная схема инженерной защиты, включающая в себя генеральные планы, детальные и специальные схемы с целью вариативной проработки проектных решений, оптимизации проектирования, оценки предотвращенного ущерба, обоснования инвестиций и предварительного расчета укрупненной ориентировочной стоимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ключков В.В. Взаимосвязь стратегий научно-технического и пространственного развития России // Россия: тенденции и перспективы развития. 2019. № 14-1. С. 101–106. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyaz-strategiy-nauchno-technologicheskogo-i-prostranstvennogo-razvitiya-rossii>
2. Колмакова Е.М., Колмакова И.Д., Дегтярева Н.А. Пространственное развитие региона в контексте стратегии социально-экономического роста // Вестник Челябинского государственного

университета. 2018. № 3 (413). С. 30–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-razvitiye-regiona-v-kontekste-strategii-sotsialno-ekonomicheskogo-rosta>

3. Колмакова И.Д., Колмакова Е.М., Силинцев В.С., Гарипов Р.И. Территориальное планирование сбалансированного социо-эколого-экономического развития // Управление сбалансированным развитием территориальных систем: вопросы

теории и практики. Челябинск, 2016. С. 250–291. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25995919&>

4. Дегтярев Б.М. К вопросу об инженерно-строительной безопасности территорий при градостроительном проектировании // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2015. № 1 (9). С. 80–87. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23529482>

5. Курушина Е.В., Петров М.Б. Критерии успешности проектов пространственного развития на основе межрегиональной интеграции // Экономика региона. 2018. Т. 14. Вып. 1. С. 176–189. URL: <https://www.economyofregion.com/archive/2018/68/3018/>

6. Андреев А.В. Перспективы пространственного развития Приморского края // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2018. Т. 7. № 2 (23). С. 22–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-prostranstvennogo-razvitiya-primorskogo-kraja>

7. Карпова Н.В. Устойчивое развитие городских поселений: теоретические постулаты и их практическая реализация // Экономика и экология территориальных образований. 2019 Т. 3. № 3. С. 64–70. DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-3-64-70

8. Корчак А.В. Проблемы, направления и пути решения задач освоения подземного пространства мегаполисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 5. С. 89–98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-napravleniya-i-puti-resheniya-zadach-osvoeniya-podzemnogo-prostranstva-megapolisov>

9. Абрамян С.Г. Экологическое обеспечение строительства линейно-протяженных сооружений // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 114–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskoe-obespechenie-stroitelstva-lineynoprotyazhennyh-sooruzheniy-1>

10. Куликова Е.Ю., Корчак А.В., Левченко А.Н. Анализ факторов риска при строительстве городских подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. № 11. С. 5–11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-riska-pri-stroitelstve-gorodskih-podzemnyh-sooruzheniy>

11. Душкова Д.О., Евсеев А.В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России // Арктика и Север. 2011. № 4. С. 169–195. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnogennogo-vozdeystviya-na-geosistemyevropeyskogo-severa-rossii>

12. Зайченко Е.Н. Особенности зеленого нормирования и проектирования в современных условиях // Современные технологии. 2016. № 18. С. 71–79. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zelenogo-normirovaniya-i-proektirovaniya-v-sovremennyh-usloviyah>

13. Фалеев М.И., Черных Г.С., Старостин А.С. Оценка опасностей и угроз, обусловленных катастрофическими наводнениями, и предложения по защите населения и территорий от них // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4. № 2. С. 18–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-opasnostey-i-ugroz-obuslovlennyh-katastroficheskimi-navodneniyami-i-predlozheniya-pozaschite-naseleniya-i-territoriy-ot-nih>

14. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Природные и антропогенные причины наводнений // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2013. Т. 3. № 1. С. 269–281. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodnye-i-antropogennye-prichiny-navodneniy>

15. Белоусова А.П. Оценка рисков подтопления территорий подземными водами при наводнениях // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 1. С. 30–38.

16. Тимофеева С.С., Элит В.Э., Морозова О.В. Мониторинг наводнений на территории Иркутской области на основе ретроспективного анализа // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9 (56). С. 82–89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-navodneniy-na-territorii-irkutskoy-oblasti-na-osnove-retrospektivnogo-analiza>

17. Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Климатические изменения в бассейне Амура и их влияние на экосистемы // Экосистемы: экология и динамика. 2018. Т. 2. № 4. С. 5–60. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10020

18. Разумов В.В., Разумова Н.В., Пчелкин В.И. Масштабы и опасность наводнений в Сибирском регионе России // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 4. С. 103–144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/masshtaby-i-opasnost-navodneniy-v-sibirskom-regione-rossii>

19. Белякова А.Ю., Вашукевич Е.В., Иванов Я.М., Петрова С.А. Тенденции изменчивости природных событий юга Восточной Сибири // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 10 (93). С. 80–85. URL: [http://journals.istu.edu/vestnik\\_irgtu/journals/2014/10/articles/12](http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2014/10/articles/12)

20. Шамин С.И., Санина А.Т. Основные тенденции изменения частоты появления опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — мирового центра данных. 2019. Вып. 184. С. 54–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38564018>

21. Коришонов А.А., Рыбанова А.Ю., Фокичева А.А., Шаймарданов М.З. Анализ интенсивности воздействия опасных условий погоды на социально-экономическую систему // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического

университета. 2018. № 53. С. 18–33. URL: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/maket-53s-18-33.pdf>

22. Крестин Б.М., Мальнева И.В. Активность оползневых и селевых процессов на территории Большого Сочи и ее изменения в начале XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 1. С. 58–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23199953>

23. Мальнева И.В. Природные катастрофы, связанные с опасными геологическими процессами, и их прогнозирование // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 1. С. 12–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodnye-katastrofy-svyazannyes-opasnymi-geologicheskimi-protsessami-i-ih-prognozirovani>

24. Брылев В.А., Корхова Ю.А. Древние и современные оползни Нижнего Поволжья и факторы их образования // Геоморфология. 2010. № 4. С. 37–47. DOI: 10.15356/0435-4281-2010-4-37-46

25. Конюшков В.В. Инженерная защита территории от склоновых процессов с учетом природных условий и техногенных воздействий // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 137–142. DOI: 10/23968/1999-5571-2017-14-2-137-142

26. Белов А.А., Кирюшин А.В., Маскайкин В.Н. Инженерная подготовка городской территории при подтоплении // Научное обозрение. Раздел II. Наука и практика. 2017. № 1. С. 1–13. URL: <https://srjournal.ru/wp-content/uploads/2017/03/ID25.pdf>

Поступила в редакцию 24 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 11 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 25 августа 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Павел Анатольевич Журавлев — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 756279; [pazh@yandex.ru](mailto:pazh@yandex.ru);

Артур Марукович Марукян — кандидат технических наук, доцент, член ГАК; ООО «Стройгазмон-таж»; 119415, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 53; РИНЦ ID: 1063001; [A8874316@yandex.ru](mailto:A8874316@yandex.ru).

## REFERENCES

1. Klochkov V.V. Interrelation of strategies of scientific and technical and spatial development of Russia. *Russia: trends and prospects for development*. 2019; 14-1:101-106. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyaz-strategiy-nauchno-tehnologicheskogo-i-prostranstvennogo-razvitiya-rossii> (rus.).

2. Kolmakova Ye.M., Kolmakova I.D., Degtyareva N.A. Spatial development of the region in the context of the strategy for socio-economic growth. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. 2018; 3:30-37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-razvitie-regiona-v-kontekste-strategii-sotsialno-ekonomicheskogo-rosta> (rus.).

3. Kolmakova I.D., Kolmakova E.M., Silincev V.S., Garipov R.I. Territorial planning of balanced socio-ecological and economic development. *Managing the balanced development of territorial systems: issues of theory and practice*. Chelyabinsk, 2016; 250-291. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25995919&> (rus.).

4. Degtyarev B.M. To the question of security territories with urban planning design. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2015; 1:80-87. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23529482> (rus.).

5. Kurushina E.V., Petrov M.B. Performance criteria of spatial development projects based on interregional integration. *Economy of Region*. 2018;

14(1):176-189. URL: <https://www.economyofregion.com/archive/2018/68/3018/> (rus.).

6. Andreev A.V. Perspectives of Primorskiy krai spatial development. *Azimuth of scientific research: Economics and management*. 2018; 7(2):22-26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-prostranstvennogo-razvitiya-primorskogo-kraya> (rus.).

7. Karpova N.V. Sustainable development of urban settlements: theoretical postulates and their practical implementation. *Economy and ecology of territorial formations*. 2019; 3(3):64-70. DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-3-64-70 (rus.).

8. Korchak A.V. Problems, directions and ways of decision of problems of town-planning development of underground space of megacity. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 5:89-98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-napravleniya-i-puti-resheniya-zadach-osvoeniya-podzemnogo-prostranstva-megapolisov> (rus.).

9. Abramyanyan S.G. Environmental support for the construction of linear-extended structures. *Vestnik MGSU*. [Monthly Journal of Construction and Architecture]. 2009; 3:114-119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskoe-obespechenie-stroitelstva-lineynoprotyazhennyh-sooruzheniy-1> (rus.).

10. Kulikova E.Yu., Korchak A.V., Levchenko A.N. Analysis of risk factors in the construction

of urban underground structures. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2004; 11:5-11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-riska-pri-stroitelstve-gorodskih-podzemnyh-sooruzheniy> (rus.).

11. Dushkova D.O., Evseev A.V. Analysis of technogenic impact on geosystems of the European Russian North. *Arctic and North*. 2011; 4:169-195. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnogenogo-vozdeystviya-na-geosistemy-evropeyskogo-severa-rossii> (rus.).

12. Zaychenko E.N. Features of green rationing and design in modern conditions. *Modern technologies*. 2016; 18:71-79. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zelenogo-normirovaniya-i-proektirovaniya-v-sovremennyh-usloviyah> (rus.).

13. Faleev M.I., Chernykh G.S., Starostin A.S. Assessment of hazards and threats caused by catastrophic floods and proposals for protecting the population and territories from them. *The strategy of civilian protection: issues and research*. 2014; 4(2):18-32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-opasnostey-i-ugroz-obuslovlennyh-katastroficheskimi-navodneniyami-i-predlozheniya-po-zaschite-naseleniya-i-territoriy-ot-nih> (rus.).

14. Avakyan A.B., Istomina M.N. Natural and anthropogenic causes of floods. *The strategy of civilian protection: issues and research*. 2013; 3(1):269-281. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodnye-i-antropogennye-prichiny-navodneniy> (rus.).

15. Belousova A.P. Assessment of the risks of flooding of territories with groundwater during floods. *Water resources*. 2011; 38(1):30-38. (rus.).

16. Timofeeva S.S., Eglit V.E., Morozova O.V. Flood monitoring on the territory of the Irkutsk region based on a retrospective analysis. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011; 9:82-89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-navodneniy-na-territorii-irkutskoy-oblasti-na-osnove-retrospektivnogo-analiza> (rus.).

17. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. Climate changes in the Amur basin and way their affect ecosystems. *Ecosystems: ecology and dynamics*. 2018; 2(4):5-60. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10020 (rus.).

18. Razumov V.V., Razumova N.V., Pchelkin V.I. The magnitude and the risk of of flooding in the Siberian region of Russia. *Science. Innovations. Technologies*. 2015; (4):103-144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/masshtaby-i-opasnost-navodneniy-v-sibirskom-regione-rossii> (rus.).

19. Belyakova A.Yu., Vashukevich E.V., Ivanoy Ya.M., Petrova S.A. Natural event variability trends in the South of Eastern Siberia. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014; 10:80-85. URL: [http://journals.istu.edu/vestnik\\_irgtu/journals/2014/10/articles/12](http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2014/10/articles/12) (rus.).

20. Shamin S.I., Sanina A.T. Hydrometeorological hazards frequency estimated for constituent territories of the Russian Federation. *Proceedings of VNIIGMI-MCD*. 2019; 184:54-66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38564018> (rus.).

21. Korshunov A.A., Rybanova A.Yu., Fokicheva A.A., Shaimardanov M.Z. Analysis of the intensity of the impact of hazardous weather conditions on the socio-economic system. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; 53:18-33. URL: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/maket-53s-18-33.pdf> (rus.).

22. Krestin B.M., Mal'neva I.V. The intensity of landslide and mudflow processes in the greater sochi area and its variation in the early XXI century. *Water Resources*. 2016;43:974–981. DOI: 10.1134/S0097807816070058

23. Malneva I.V. Natural catastrophes, connected with hazardous geological processes, and their prediction. *The Life of the Earth*. 2017; 39(1):12-25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodnye-katastrofy-svyazannyes-opasnymi-geologicheskimi-protsessami-i-ih-prognozirovanie> (rus.).

24. Brylev V.A., Korhova Yu.A. Ancient and recent landslides in the Lower Volga region and factors of their formation. *Geomorphology RAS*. 2010; 4:37-47. DOI: 10.15356/0435-4281-2010-4-37-46 (rus.).

25. Konyushkov V.V. Engineering protection of territories from slope shift processes taking into account natural conditions and technogenic loads. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 2:137-142. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-137-142 (rus.).

26. Belov A.A., Kiryushin A.V., Maskaykin V.N. Engineering preparation of urban area under flooding. *Scientific Review. Section II. Science and practice*. 2017; 1:1-13. URL: <https://srjournal.ru/wp-content/uploads/2017/03/ID25.pdf> (rus.).

Received July 24, 2020

Adopted in revised form on August 11, 2020

Approved for publication on August 25, 2020.

**Bi o n o t e s :** Pavel A. Zhuravlev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Technology, Organization and Management in Construction Department; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 756279; pazh@yandex.ru;

Artur M. Marukyan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, member of GAC; **Stroygazmontazh LLC**; 53 Vernadsky Ave., Moscow, 119415, Russian Federation; ID RISC: 1063001; A8874316@yandex.ru.

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 67.05; 69.002.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460

## Оценка возможности и целесообразности создания строительного РТК укладки газобетонных блоков

В.С. Лагута<sup>1</sup>, С.В. Калинин<sup>2</sup>, В.Э. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт производственных исследований; г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> ГРАС ЖИЛСТРОЙ; г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В строительной отрасли развитию автоматизации на основе применения робототехнических систем способствует развитие строительных технологий и материалов, в частности применение газобетонных блоков (ГБ) увеличенных габаритов и веса. Из-за значительной стоимости создания и эксплуатации роботизированных комплексов, заменяющих рабочего на площадке, необходимо серьезное обоснование эффективности (инвестиционной привлекательности). Для этого следует укрупненно оценить стоимость и требуемое время на разработку и внедрение, поскольку универсальных и всеобъемлющих решений не существует.

**Материалы и методы.** Обобщен практический опыт решения проектных и конструкторских задач создания новой техники и разработки инвестиционных проектов для задачи создания строительного роботизированного технологического комплекса (РТК) укладки ГБ при возведении зданий и сооружений. Привлечены две группы экспертов — в области строительства и специалистов-разработчиков роботизированных и мехатронных систем. Используются методы экспертных оценок и математической статистики, профильные интернет-ресурсы, публикации по конструкторским и техническим решениям.

**Результаты.** Сформирован перечень показателей, характеризующих эксплуатационные возможности РТК, выбраны наиболее значимые. Определена группа параметров, реализация которых на проектируемом РТК позволит осуществить укладку блоков в идеальном случае. Получено техническое описание варианта строительного РТК, представлены оценки стоимостных и временных ресурсов для его создания.

**Выводы.** Показана формализация описаний строительного РТК в процессе выработки концептуального технического решения, а также возможность на этапе постановки задачи (предпроектные исследования) получения достоверных оценок вероятных затрат по стоимости и по времени на создание РТК, что важно для оценки реализуемости соответствующего инвестиционного процесса (бизнес-плана) и принятия решения по открытию проектных работ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительный робототехнический комплекс, укладка блоков, экспертиза, экспертные оценки, оценка стоимости разработки, принятие решения

*Благодарности.* Авторы выражают глубокую признательность начальнику отдела НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана Александру Юрьевичу Малыхину за помощь при подготовке статьи.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лагута В.С., Калинин С.В., Кузнецов В.Э. Оценка возможности и целесообразности создания строительного РТК укладки газобетонных блоков // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1450–1460. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460

## Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: feasibility and expediency assessment

Viktor S. Laguta<sup>1</sup>, Sergei V. Kalinichenko<sup>2</sup>, Vladimir E. Kuznecov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Industrial Researches; Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University (BMSTU); Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> GRAS ZHILSTROY; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Development of construction technologies and materials entails the use of larger and heavier aircrete blocks. Hence, it promotes construction industry automation through the use of robotic systems. Due to considerable costs of development, production and operation of robotic systems capable of substituting human workers at a construction site, thorough substantiation of their efficiency (or investment appeal) is required. It encompasses the calculation of total costs and the timing of its development and implementation, since no universal comprehensive solutions are available now.

**Materials and methods.** The co-authors have summarized practical design and engineering problems that may accompany the development of novel machinery and preparation of investment projects towards development of a construction robotic system (CRS) designated for aircrete block laying in the course of construction of buildings and structures. Two groups of experts were involved, Group One had civil engineers and Group Two had designers of robotic and mechatronic systems. Methods of expert evaluations and mathematical statistics were used; the co-authors also addressed specialized Internet websites and publications on design and engineering solutions.

**Results.** A list of criteria describing the performance of a robotic system was made with a focus on most important factors. The co-authors identified a set of parameters whose availability in a robotic system ensures ideal blockwork. The co-authors have developed a technical specification for a robotic system, identified its cost and developed an implementation schedule.

**Conclusions.** A formalized description of the future CRS, designated for construction purposes, is provided for the period of concept development. The co-authors also provided a reliable assessment of potential costs and schedules at the problem statement stage (a feasibility study), as it is important for the assessment of implementability of investment processes (a business plan) in terms of making a decision to initiate project implementation.

**KEYWORDS:** robotic construction system, block laying, expert examination, expert estimates, development cost assessment, decision making

**Acknowledgements.** The co-authors express their deep gratitude to Dr. Alexander Malykhin, Director, Department of the Research and Educational Centre for Robotics at the Bauman Moscow State Technical University for his kind assistance in drafting this manuscript.

**FOR CITATION:** Laguta V.S., Kalinichenko S.V., Kuznecov V.E. Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: feasibility and expediency assessment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1450-1460. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Роботизация в строительной отрасли — одно из направлений повышения эффективности и качества работ. Исследования и разработки в этом направлении ведутся уже несколько десятилетий во многих странах мира [1–3]; созданная в 1990 г. Международная ассоциация по автоматизации и робототехнике в строительстве (IAARC) проводит ежегодные симпозиумы, на которых обсуждаются различные научные и технические аспекты строительных роботов [4–8], их подсистемы [9–11], перспективы и тенденции их развития [12].

Интерес к созданию робототехнических систем для автоматизации строительных операций растет и в России, доказательством чему могут служить последние научные публикации по данной теме [13–20].

Основная проблема, связанная с предполагаемым внедрением новой техники, — выбор направления решения технической задачи. Современное состояние развития систем автоматизации и робототехники предполагает широкий спектр технических решений как в готовом виде («под ключ»), так и в виде автономных подсистем («полуфабрикаты»). Однако это не снижает ответственности за принятие решения о начале проектных работ, поскольку создание (внедрение) сложных систем потребует привлечения высококлассных специалистов и/или инженеринговых компаний. А стоимость проектных, опытно-конструкторских работ (ОКР) в этой области существенно превышает стоимость разрабатываемого «железа».

Неопределенность ситуации максимальна в «начале пути», отсюда и желание (вернее, необходимость) хотя бы ориентировочно оценить объем предстоящих затрат и длительность проектных работ. Практически единственный вариант формализации

такого рода проблем и поэтапного снижения неопределенности постановки задачи для проектировщиков (если речь идет о новой технике) — проведение этапных экспертиз. На практике подобные методики практически не используются из-за сложности предлагаемых процедур определения вариантов технических решений и способов получения критериальных оценок. По этим же причинам в качестве объектов рассматриваются, как правило, хорошо отработанные варианты технических решений для серийной продукции, имеющей достаточно длительную «историю» эксплуатации, например, гидравлические системы [21].

Задача, которую поставили перед собой авторы, — показать на практическом примере строительного роботизированного технологического комплекса (РТК) укладки газобетонных блоков (ГБ), как провести анализ и получить количественную информацию для принятия решения о начале проектных работ по созданию новой техники. В статье изложены результаты экспертных исследований постановки проектной задачи и приведены оценки требуемых ресурсов по осуществлению проекта в целом. Отметим, что при общем положительном решении заказчика об открытии работ на основании результатов подобных исследований формируется концепция проектного решения, т.е. технический облик РТК.

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1. Подготовительный — формирование ограничений, связанных с объектом роботизации и возможностями организации-заказчика по осуществлению проектных и опытно-конструкторских работ. На подготовительном этапе также формируется перечень показателей, характеризующих эксплуатационные возможности РТК при проведении экспертизы.

2. Ранжирование показателей по значимости.
3. Формирование списка параметров, реализация которых на проектируемом РТК позволит осуществить укладку ГБ в идеальном случае.
4. Ранжирование параметров РТК по степени влияния на выбранный на предыдущем этапе наиболее значимый показатель или группу наиболее значимых показателей.
5. Формирование «прообраза» планируемого к созданию РТК.
6. Формирование прогностических оценок временных рамок и стоимости планируемого к разработке РТК на основе информационного анализа состояния рынка поставщиков робототехнических систем и/или отдельных средств автоматизации.

Рассмотрим указанные этапы подробнее.

#### **Первый этап — подготовительный**

Поскольку предполагается при строительстве различных объектов заменить ручную кладку ГБ на роботизированную, то на основании общего описания предполагаемых работ необходимо сформулировать перечень показателей, характеризующих применение РТК. Предварительно выделим особенности использования ГБ в строительстве:

- для эффективного применения ГБ желательно использовать блоки максимально возможных габаритов. Это делает проблемным ручную укладку, так как вес крупногабаритных блоков (например, марок D600 или D700) может превышать 60 кг;
- наличие высоких требований по качеству кладки — толщина шва, величина допустимых перекосов, целостность ГБ и т.п., т.е. то, что определит прочность строительной конструкции, будущие теплопотери, расположение и геометрию «стенки» для последующих работ по внутренней отделке.

В качестве дополнительных ограничений, конкретизирующих задачу создания СРТК укладки ГБ, выступают требования для гражданского строительства многоэтажных зданий и, в частности, функционирование в ограниченном пространстве по высоте (расстояние между перекрытиями от 2,7 до 4,0 м).

Под показателями РТК будем понимать качественные и количественные характеристики применения комплекса в процессе укладки ГБ. Например, с точки зрения процесса разработки строительного РТК можно выделить показатели, характеризующие ограничения по его применению, такие как «максимальный вес ГБ» или «точность укладки ГБ». Очевидно, что эти характеристики войдут в ТЗ на разработку РТК в качестве безусловных требований. «Масса — габаритные данные РТК» также войдут в ТЗ, но в качестве ограничений на выбираемые технические решения. Еще часть характеристик представляют параметры строительного РТК, которые обеспечивают задаваемые при проектировании функциональные возможности комплекса. Например, «наличие дополнительных функциональных

возможностей РТК — подрезка блоков до нужного размера» или «штрабление пазов» и др. Интегральные характеристики функционирования РТК, например «стоимость приобретения и монтажа, рублей» и др.

В представляемой методике для оценки возможного технического решения комплекса необходимо подобрать такие показатели, которые будут характеризовать технический процесс укладки ГБ в целом. Причем такие показатели должны отражать интегральное влияние отдельных компонент роботизированного комплекса на его функциональные возможности.

По мнению авторов, в этот перечень входят:

1. Возможность укладки ГБ в различных направлениях, в том числе круговая кладка.
2. Возможность укладки нестандартных элементов, таких как арматура, П-образные и О-образные блоки и др.
3. Возможность только линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлении).
4. Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час.
5. Возможность только линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлении), в том числе с формированием проемов и углов.
6. Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>.
7. Степень автоматизации вспомогательных процессов для работы РТК.
8. Скорость кладки, шт./час.

Отсутствие в перечне традиционных экономических показателей, таких как стоимость приобретения и монтажа, не случайно. На предпроектной стадии, когда проблема только формулируется и варианты возможных решений достаточно «туманны», говорить о стоимости будущего РТК можно лишь условно — оценка затрат будущего проекта и является целью реализации описываемой методики, а анализируемые показатели и параметры должны стать «инструментом» получения такой оценки.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

### **Второй этап — ранжирование показателей по значимости**

Рекомендуемое количество одновременно выносимых на экспертизу факторов, как правило, определяется квалификацией и количеством участвующих экспертов. Для проведения экспертизы показателей выбран метод парных сравнений [22]. В качестве экспертов в количестве шести специалистов выступили сотрудники предприятий, занимающихся строительством с широким использованием ГБ и располагающих требуемым опытом организации и управления строительными работами.

Результаты проведенной экспертизы представлены в табл. 1, где  $M = 6$  — количество экспертов;  $N = 8$  — количество анализируемых факторов.

**Табл. 1.** Общая ранжировка по показателям РТК укладки ГБ (число экспертов — 6)

**Table 1.** General breakdown by CRS performance in terms of block laying (number of experts: 6)

N / M	Э1 / E1	Э2 / E2	Э3 / E3	Э4 / E4	Э5 / E5	Э6 / E6	Сумма / Total	Ранг / Position
1	3,00	4,20	3,50	3,30	2,00	1,70	17,7	6
2	2,40	2,30	2,90	2,10	2,00	1,70	13,4	8
3	2,30	2,80	3,20	3,10	2,00	2,90	16,3	7
4	4,30	4,40	4,70	4,40	6,00	2,90	26,7	1
5	4,40	4,10	3,60	4,10	2,00	5,10	23,3	4
6	4,20	3,00	2,00	3,70	6,00	5,10	24,0	3
7	2,70	2,70	3,00	3,50	6,00	2,90	20,8	5
8	4,70	4,50	5,10	3,80	2,00	5,70	25,8	2

*Примечание.* Коэффициент согласованности мнений экспертов (коэффициент конкордации) равен 0,53.

Величина доверительной вероятности — 95 %.

*Note.* Consistency of expert opinions (coefficient of concordance) equals to 0.53. Confidence probability — 95 %.

Вывод по результатам проведенной экспертизы: недоминируемый показатель — «Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час». Однако близкие значения рангов для факторов № 4, 6, 8 позволяют говорить о группе наиболее значимых показателей, в том числе «Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>» и «Скорость кладки, шт./час».

### Третий этап — ранжирование параметров РТК

Под «параметрами РТК» будем понимать как подсистемы комплекса (в том числе технические, программные управления, вспомогательные и др.), так и его отдельные элементы, реализующие определенные функциональные возможности. Список параметров РТК, выносимых на экспертизу в идеальном случае, охватывает все множество возможных технических решений, которые позволяют осуществить планируемые работы в идеальном случае, т.е. в отсутствии каких-либо конструкторских ограничений. Однако для этапа предпроектных исследований достаточно сложных РТК трудно ожидать получения точной информации, тем более в области инновационных разработок, каковым является РТК укладки ГБ. Поэтому необходимо сгруппировать совокупность параметров таким образом, чтобы эксперты могли однозначно связать анализируемые параметры с эффектом влияния на группу наиболее значимых показателей РТК.

В нашем случае предыдущий этап методики позволил выявить в том числе, основное желательное направление технической реализации РТК — возможность линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлениях), в том числе с формированием проемов и углов. Рассмотрим принципиальную схему функционирования РТК на площадке укладки ГБ (рис. 1). ГБ должны быть уложены по заданному периметру на заданную высоту. Это — зона глобальной системы координат

(ГСК). В этих координатах РТК осуществляет горизонтальное перемещение и позиционирование комплекса для последующего нанесения клея и укладки ГБ по вертикали (рис. 1). Манипулирование ГБ осуществляется в региональной системе координат (РСК). Здесь осуществляются следующие действия:

- извлечение ГБ из магазина;
- перемещение в зону нанесения клея;
- перемещение в рабочую зону кладки ГБ;
- вертикальное и горизонтальное перемещение в РСК.

В рабочей зоне (РЗ) комплексом проводятся действия (рис. 1):

- позиционирование ГБ с заданной точностью;
- прижим и установка ГБ в ряд.

В результате проведенного анализа принципиально возможных решений по роботизации, которые могут быть использованы (хотя бы в какой-то части) для процесса укладки ГБ [13, 14, 17], предложена группировка возможных вариантов реализации РТК, которая представлена в табл. 2. Необходимо отметить, что в общем случае дополнительно могут быть рассмотрены и включены в анализ специализированные системы обеспечения функционирования РТК, т.е. дополнительные параметры, например для «полевых условий» применения или для объектов специального назначения (оборонительные сооружения и т.п.).

Ранее мы получили группу наиболее значимых показателей. Поэтому для экспертов третьего этапа можно задать направление оценки влияния анализируемых параметров РТК, а именно:

- «Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час» — *минимум*;
- «Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>» — *максимум*;
- «Скорость кладки, шт./час» — *максимум*.

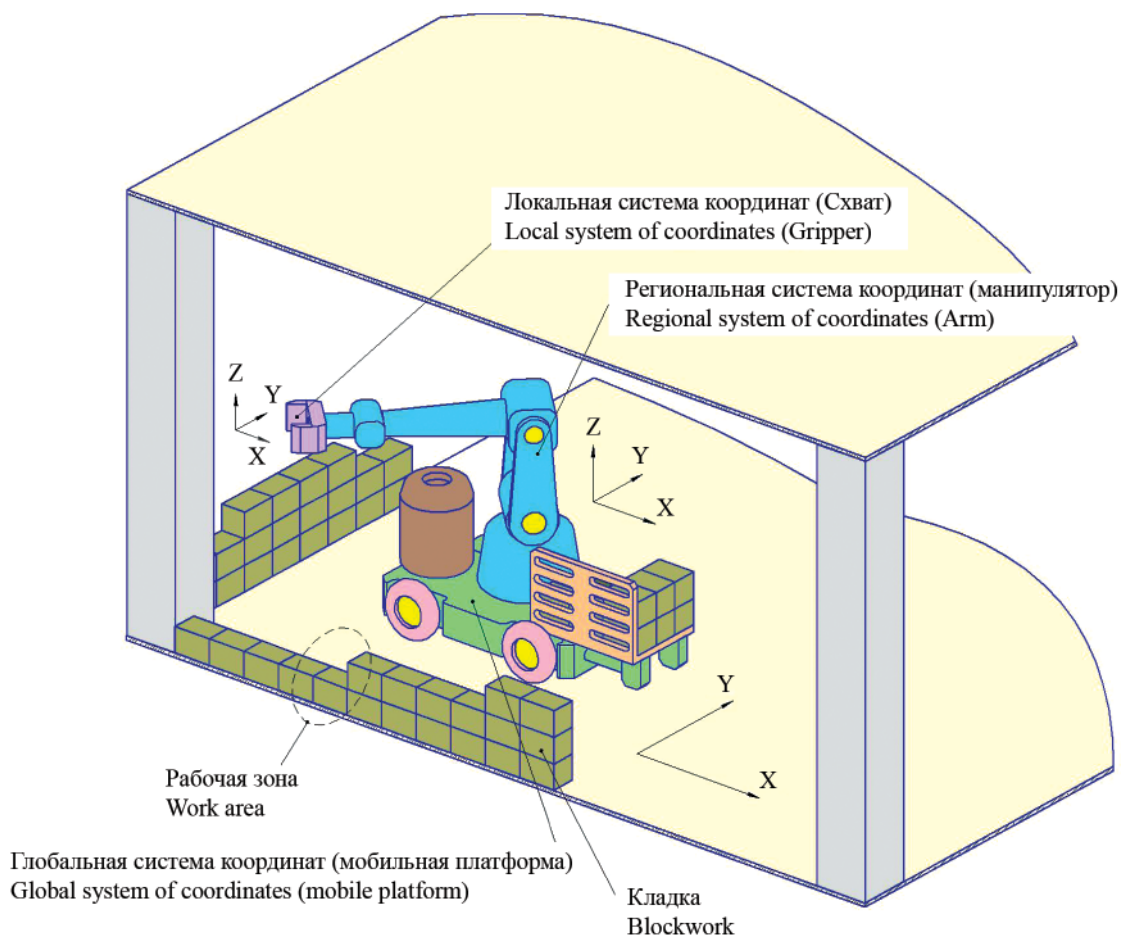


Рис. 1. Схема функционирования РТК на площадке укладки ГБ

Fig. 1. CRS functional diagram describing aircrete block laying on the construction site

Табл. 2. Группировка параметров РТК для проведения экспертизы

Table 2. CRS parameter clustering for an expert examination

Наименование фактора Factor name	Варианты исполнения Design options	Вес в баллах, среднее (min/max) Value in points, average (min/max)		
Система перемещения РТК в глобальной системе координат CRS travel system in the global system of coordinates	1.1. Колесная с предустановленными направляющими Wheel system on pre-installed guide rails	<b>0,43 (0,1/0,7)</b>		
	1.2. На колесном шасси / Wheel chassis	0,32 (0,1/0,8)		
	1.3. На гусеничном шасси / Crawler chassis	0,25 (0,0/0,6)		
Система ориентации Orientation system <b>ГСК</b> — в глобальной системе к-т; In the global system of coordinates <b>РСК</b> — в региональной системе к-т; In the regional system of coordinates <b>РЗ</b> — в рабочей зоне In the work area (WA)		<b>ГСК</b> GCS	<b>РСК</b> RCS	<b>РЗ</b> WA
	1.1. Спутниковая навигация / Satellite navigation	0,18	0,09	0,02
	1.2. Геодезическая привязка / Geodetic connection	<b>0,34</b>	0,10	0,02
	1.3. На основе лазерных дальнометров By means of laser scanners	0,21	0,19	0,10
	1.4. На основе систем технического зрения By means of machine vision systems	0,12	0,21	0,12
	1.5. На основе датчиков скорости и положения By means of speed and position sensors	0,08	<b>0,31</b>	0,26
	1.6. На основе датчиков наличия контакта By means of touch sensors	0,05	0,10	<b>0,48</b>

Окончание табл. 2

Наименование фактора Factor name	Варианты исполнения Design options	Вес в баллах, среднее (min/max) Value in points, average (min/max)		
		ГСК GCS	РСК RCS	РЗ WA
Приводы системы позиционирования Drives of the positioning system ГСК — в глобальной системе к-т; In the global system of coordinates (GSC) РСК — в региональной системе к-т; In the regional system of coordinates (RSC); РЗ — в рабочей зоне In the work area (WA)	1.1. Электрический / Electric	<b>0,80</b>	<b>0,62</b>	<b>0,58</b>
	1.2. Гидравлический / Hydraulic	0,14	0,20	0,18
	1.3. Пневматический / Pneumatic	0,03	0,03	0,10
	1.4. Беспроводная (механическая) Mechanical (drive-free)	0,03	0,15	0,14
Приводы системы захвата Gripper drives	1.1. Электрический / Electric	<b>0,52</b>	<b>(0,3/0,8)</b>	
	1.2. Гидравлический / Hydraulic	0,23	(0,0/0,4)	
	1.3. Пневматический / Pneumatic	0,25	(0,0/0,6)	
Локальный склад блоков Local warehouse of blocks	1.1. Магазин на РТК On-board CRS block storage	<b>0,43</b>	<b>(0,0/0,7)</b>	
	1.2. Независимый склад-накопитель Standalone block storage	0,40	(0,1/0,8)	
	1.3. Перегрузка оператором с поддона Reloading by an operator from a pallet	0,17	(0,0/0,4)	
Тип системы управления РТК CRS control system type	1.1. Автоматическое / Automatic control	<b>0,28</b>	<b>(0,0/0,5)</b>	
	1.2. Ручное / Manual control	0,18	(0,0/0,4)	
	1.3. Коллаборативное / Collaborative control	0,2	(0,0/0,7)	

Для проведения экспертизы этого этапа использован метод балльных оценок [22]. В качестве экспертов в исследовании приняли участие сотрудники МГТУ им. Н.Э. Баумана, занимающиеся проектированием и изготовлением автоматизированного оборудования и робототехники — НУЦ «Робототехника», кафедр робототехнические системы и мехатроника и компьютерные системы автоматизации производств.

В табл. 2 указан средний (по всем экспертам) вес в баллах для анализируемых факторов, а также минимальное и максимальное значения из полученных экспертных оценок.

На следующем, **четвертом этапе**, полученные весовые коэффициенты факторов позволяют «описать» ориентировочный облик («прообраз») рассматриваемого РТК. В нашем случае — это техническая система в составе:

- «Система перемещения РТК в глобальной системе координат» — колесная с предустановленными направляющими;
- «Система ориентации в глобальной системе координат» — на основе геодезической привязки;
- «Система ориентации в региональной системе координат» — на основе датчиков скорости и положения;
- «Система ориентации в рабочей зоне» — на основе датчиков наличия контакта;
- Приводы в РТК — электрические;
- Локальный склад ГБ организуется непосредственно на РТК — «магазин на РТК»;
- «Управление РТК» — автоматическое.

Анализ полученных результатов экспертизы параметров РТК показал определенную взаимосвязь выбранных экспертами вариантов технических решений. Действительно, для монтажа направляющих в РТК укладки ГБ необходимо «определить положение закрепленных на местности точек, зданий и сооружений и их элементов в принятых системах координат и высот» (СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства»), т.е. в нашем случае осуществить геодезическую привязку в каждой точке позиционирования РТК в глобальной системе координат. Это же решение позволяет наиболее эффективно использовать построение системы ориентации в РСК на основе датчиков скорости и положения, поскольку движение осуществляется в «фиксированной» координате ГСК и конструктивная жесткость РТК на направляющих достаточна для их использования. Ожидаемым оказался выбор экспертов в пользу единого принципа движения в системе, в нашем случае — на основе электроприводов. Решение по автоматическому принципу управления РТК (без участия человека), возможно, продиктовано соображениями техники безопасности для предполагаемых условий «непрерывной» эксплуатации.

Следующий этап — **пятый** — информационный анализ состояния рынка поставщиков робототехнических систем, отдельных модулей и систем автоматизации, хотя бы частично включающих выбранные параметры РТК. Технически это реализуется анализом практического опыта создания робототехни-

ческих систем привлеченными ранее экспертами; справочной информации, доступной в интернете (см. выше); технической и экономической документацией, полученной из официальных источников, в том числе по запросам соответствующих коммерческих предложений. Эта информация может быть, в принципе, подготовлена параллельно второму и третьему этапам реализации рассматриваемой методики. Однако необходимо иметь в виду, что полученные экспертные оценки показателей и параметров РТК могут оказаться полезными для сокращения пространства информационного поиска.

Для оценки стоимости разрабатываемого РТК используем направление автоматизации процесса укладки ГБ, а именно:

- сначала перемещение в глобальной системе координат, в нашем случае — это движение по направляющим и фиксация в конечном положении для начала движения в региональной системе координат;
- затем перемещение в региональной системе координат до точки выдачи ГБ для нанесения клея и укладки в заданной точке возводимой стенки;
- наконец, осуществление «финишных» манипуляций с ГБ в рабочей зоне и перемещение в начальное положение РСК.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве технического аналога для перемещения в ГСК возможно конструктивное решение, реализованное в автоматизированном устройстве для кладки кирпичей Motor Mason<sup>1</sup>. Отметим, что речь идет только о схематехническом решении, поскольку вариант-аналог представляет механизированную конструкцию. С учетом оснащения системой электроприводов и информационного оборудования (см. табл. 2) стоимостная оценка подобного

<sup>1</sup> Роботизация: Стройплощадка будущего: эволюция роботов-каменщиков. URL: <http://robotrends.ru/pub/1947/robotizaciya-stroyploshadka-budushhego-evolyuciya-robotov-kamenshikov>

решения составит ориентировочно около 3 млн руб. Прогнозное значение затрат на проектирование и апробацию — около 5 млн руб., период создания опытного образца — около полугода (табл. 3).

В качестве технического аналога перемещения в РСК выбран вариант электромеханического подъемного механизма с цепным приводом<sup>2</sup>. Проведенная аналогичным образом оценка адаптированной для РСК укладки ГБ составляет около 10 млн руб., в том числе порядка 8 млн на проектирование и апробацию, и порядка шести месяцев на проведение проектных работ (табл. 3).

И, наконец, осуществление финишных манипуляций с ГБ в РЗ укладки. Здесь рассмотрена комбинация ранее рассмотренных технических решений и робота — укладчика кирпичей SAM-100<sup>3</sup>. Проведенная аналогичным образом оценка адаптированного решения с учетом оснащения соответствующим информационным оборудованием составит около 7 млн руб., в том числе порядка 4,5 млн на проектирование и апробацию, и около трех месяцев на проведение проектных работ (табл. 3).

Необходимо отметить, что длительность рассмотренных работ включает также «затраты» на заказ, изготовление и поставку деталей и комплектующих РТК. И хотя многие работы могут выполняться параллельно, практический опыт позволяет условно выделить определенную «последовательность» в общем проекте, поскольку подсистемы РТК технически взаимосвязаны и не могут разрабатываться совершенно независимо. Это предположение и позволяет условно выделить «чистое время» для создания соответствующей подсистемы РТК (см. табл. 3).

Таким образом, «накопленная» прогностическая оценка по стоимости РТК укладки ГБ составит около 29 млн руб. и не менее полутора лет проектных и опытно-конструкторских работ. Кроме этого, необходимо предусмотреть затраты на разработку

<sup>2</sup> Linde Material Handling. URL: <http://linde-mh.ru>

<sup>3</sup> Робот-каменщик SAM100 кладет кирпичи в 6 раз быстрее обычного рабочего. URL: <https://bespilot.com/news/739-sam-bricks-robot>

**Табл. 3.** Стоимость и продолжительность создания РТК укладки газобетонных блоков

**Table 3.** Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: cost and time frame

Стоимость и продолжительность работ Costs and time frame	ГСК GSC	РСК CRS	РЗ WA	Сборка, отладка, испытания Assembly, finetuning, testing	Итого Total
Комплектующие и изготавливаемые узлы, млн руб. Components and manufacturable assemblies, millions rub.	3,00	2,20	2,40	1,0	8,60 млн руб. millions rub.
Стоимость выполнения проектных работ, млн руб. Cost of design, millions rub.	5,00	8,00	4,50	3,0	20,50 млн руб. millions rub.
Длительность проектных работ, мес. Design time frame, months	6	6	3	2	17 мес. months

и создание вспомогательного оборудования и оборудования интеграции модулей в составе РТК, в том числе систем управления и обеспечения функционирования. А это еще порядка 5 млн руб., что увеличивает общую оценку примерно до 34 млн руб. Для справки — по оценкам зарубежных авторов для реализации подобного проекта потребуется не менее 2,0 млн долларов<sup>4</sup>.

## ВЫВОДЫ

Для внедрения инновационных методов выполнения строительных работ, особенно в индустриальном строительстве, созданы необходимые предпосылки. По данным авторитетного издания Transparency market Research (2019 г.), среднегодовой рост на рынке строительной робототехники составит порядка 10 % в период с 2018 по 2026 гг., т.е. объем рынка за эти годы увеличится более чем в два раза<sup>5</sup>.

Если бы не существовало системы реальных ограничений и располагаемые ресурсы заказчика работ (финансы и время) были также не ограничены, в нашем случае в ТЗ на проектирование РТК вошли бы все возможные пожелания, и в публикуемой статье не было бы практического смысла. В реальной же ситуации заказчику придется осуществлять выбор из тех параметров, которые возможны к реализации на разрабатываемом РТК, с учетом располагаемых ресурсов для проектирования, изготовления, монтажа и т.п. Или обоснованно отказаться от проведения проектных работ по полученным данным. Изложенный подход позволяет вовремя отсекал «прожектёрские планы» с одной стороны, а с другой, всерьез и, возможно, надолго начинать перспективные разработки в создании новой техники и технологий. Заметим, что в каждом случае как список показателей, так и список параметров конкретного РТК будут индивидуальны. Однако методический подход останется тем же, что, как надеются авторы, и будет представлять интерес для читателя.

<sup>4</sup> Hadrian. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/hadrian>

<sup>5</sup> Робототехника: Tractica — рынок строительных роботов стремительно растёт. URL: <https://robonews.su/22722-Robototekhnika-Tractisa-rynok-stroitel-nyh-robotov-stremitelno-rastet.html>

Используя изложенную методику, удалось связать ранжированный ряд параметров РТК с прогностической оценкой стоимости его разработки, включая системы управления и обеспечения функционирования, а также оценить стоимость и длительность проектных работ (табл. 3).

С учетом практического опыта разработки инновационного оборудования очевидно, что оценки такого рода являются «оценкой снизу». Реальные затраты потенциального инвестора будут выше, в том числе за счет стоимости привлечения финансирования, возможных накладных расходов, дополнительной налоговой нагрузки. Именно полученная количественная информация о базовых затратах на создание РТК на начальной стадии даст возможность более корректно просчитать экономику инвестиционного проекта в целом.

На основании проведенных в процессе реализации методики исследований удастся повысить, в том числе, вероятность успешной технической реализации проекта, поскольку полученные результаты позволяют сформулировать более корректное (с точки зрения возможности реализации) ТЗ на разработку.

В результате проведенных экспертиз и исследований на стол лиц, принимающих решение (ЛПР), «легли» обоснованные материалы, количественно представляющие будущий проект «в первом приближении». А это, в свою очередь, позволило соотнести планируемые финансовые возможности и перспективы с оценкой предполагаемых затрат. Анализ показал, что «в одиночку» даже крупной строительной компании не по силам осуществить разработку и ввод в эксплуатацию рассмотренного строительного РТК. Это подтверждает практический опыт создания робототехнических систем, замещающих относительно дешевый труд наемного работника низкой квалификации. Однако развитие технического прогресса не остановить — рано или поздно малоквалифицированный труд будет роботизирован. Об этом говорит практика создания и появление на рынке соответствующих РТК, в том числе и в области строительства. Сейчас для этого существуют рыночные механизмы создания дорогостоящих перспективных технических систем, таких как кооперация, частно-государственное партнерство, фонды развития промышленности, инжиниринговые центры и др. Дело «за малым» — за формированием благоприятной экономической среды для создания и внедрения подобных инноваций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Загороднюк В.Т., Паршин Д.Я. Строительная робототехника. М.: Стройиздат, 1990. 271 с.
2. Okazaki H. Current Development and Issues in Construction Robot Technology // Proceedings of the 13th

- International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 1996. DOI: 10.22260/ISARC1996/0002
3. Zavadskas E.K. Automation and robotics in construction: International research and achievements //

- Automation in Construction. 2010. Vol. 19. Issue 3. Pp. 286–290. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.12.011
4. *Cai S., Ma Z., Skibniewski M., Guo J., Yun L.* Application of automation and robotics technology in high-rise building construction: An Overview // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0044
  5. *Asadi K., Ramshankar H., Pullagurla H., Bhandare A., Shanbhag S., Mehta P. et al.* Building an integrated mobile robotic system for real-time applications in construction // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0063
  6. *Wu K., Garcia de Soto B., Adey B.T., Zhang F.* Automatic generation of the vertical transportation demands during the construction of high-rise buildings using BIM // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0014
  7. *Vukorep I.* Autonomous big-scale additive manufacturing using cable-driven robots // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0034
  8. *Krieg O.D., Lang O.* Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0070
  9. *Kerber E., Heimig T., Stumm S., Oster L., Brell-Cokcan S., Reisinger U.* Towards robotic fabrication in joining of steel // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0062
  10. *Xu S., Wang J., Wang X., Shou W.* Computer vision techniques in construction, operation and maintenance phases of civil assets: A critical review // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0090
  11. *Wen M.-C., Yang C.-H., Chen Y., Sung E.-X., Kang S.-C.* A stereo vision-based support system for tele-operation of unmanned vehicle // Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015). 2015. DOI: 10.22260/ISARC2015/0071
  12. *Gharbia M., Yan Chang-Richards A., Zhong R.* Robotic technologies in concrete building construction: a systematic review // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0002
  13. *Grigorian E.A., Surovenko V.B., Semenova M.D., Kormalova K.D.* Automated masonry method with evaluation of its productivity and quality characteristics // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 3 (78). С. 7–22. DOI: 10.18720/CUBS.78.1
  14. *Шмельёва Е.В.* Современные технологии в строительстве: роботизированная кладка кирпича // Серия «Строительство»: сб. статей магистрантов и аспирантов: в 2-х т. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 366–373.
  15. *Шагина Е.С.* Роботизация как метод повышения безопасности строительного производства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6 (21). С. 128–147.
  16. *Булгаков А.Г., Гернер И., Каден Р.* Исследования и практические примеры организации производства и использования роботов в стройиндустрии. М.: ВНИИТПИ, 2008. Вып. 1. 48 с.
  17. *Целищев О.В., Мунасыпов Р.А.* Автоматизация процесса кирпичной кладки // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 1. С. 56–61.
  18. *Короед П.С., Широков Л.А.* Повышение эффективности строительного-монтажных работ на базе внедрения роботизированных систем манипулирования // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 168–171.
  19. *Вильман Ю.А.* Прогресс в строительстве при возведении многоэтажных жилых зданий системы «Юникон» тормозится затратами ручного труда // Успехи Современной Науки. 2017. Т. 2. № 6. С. 35–38.
  20. *Королева К.Е., Вахрушев С.И.* Повышение производительности каменной кладки // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 2. С. 425–431.
  21. *Аверченков А.В., Орехов Д.В.* Выбор оптимальной конструкции гидравлической станции с помощью морфологических методов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 80–90. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-80-90
  22. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация. Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.

Поступила в редакцию 11 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Виктор Степанович Лагута** — кандидат технических наук, генеральный директор; **Институт производственных исследований**; 107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 4; РИНЦ ID: 545576; institut@imail.ru;

**Сергей Владимирович Калинин** — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры робототехнических систем и мехатроники; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)**; 105005, г. Москва, Госпитальный пер, д. 10; РИНЦ ID: 935362; kalinichenkosv@bmsu.ru;

**Владимир Эдуардович Кузнецов** — кандидат технических наук, генеральный директор; **ГРАС ЖИЛСТРОЙ**; 115230, г. Москва, Каширское шоссе, д. 3, корп. 2/стр. 9; vkuznets13@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Zagorodnyuk V.T., Parshin D.Ya. *Robotics in construction*. Moscow, Stroyizdat, 2006; 271. (rus.).
2. Okazaki H. Current development and issues in construction robot technology. *Proceedings of the 13th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 1996. DOI: 10.22260/ISARC1996/0002
3. Zavadskas E.K. Automation and robotics in construction: International research and achievements. *Automation in Construction*. 2010; 19(3):286-290. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.12.011
4. Cai S., Ma Z., Skibniewski M., Guo J., Yun L. Application of automation and robotics technology in high-rise building construction: An overview. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0044
5. Asadi K., Ramshankar H., Pullagurla H., Bhandare A., Shanbhag S., Mehta P. et al. Building an integrated mobile robotic system for real-time applications in construction. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0063
6. Wu K., Garcia de Soto B., Adey B.T., Zhang F. Automatic generation of the vertical transportation demands during the construction of high-rise buildings using BIM. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0014
7. Vukorep I. Autonomous big-scale additive manufacturing using cable-driven robots. *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0034
8. Krieg O.D., Lang O. Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0070
9. Kerber E., Heimig T., Stumm S., Oster L., Brell-Cokcan S., Reisgen U. Towards robotic fabrication in joining of steel. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0062
10. Xu S., Wang J., Wang X., Shou W. Computer vision techniques in construction, operation and maintenance phases of civil assets: A critical review. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0090
11. Wen M-C., Yang C-H., Chen Y., Sung E-X., Kang S-C. A Stereo Vision-based support system for tele-operation of unmanned vehicle. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015)*. 2015. DOI: 10.22260/ISARC2015/0071
12. Gharbia M., Yan Chang-Richards A., Zhong R. Robotic technologies in concrete building construction: A systematic review. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0002
13. Grigorian E.A., Surovenko V.B., Semenova M.D., Kormalova K.D. Automated masonry method with evaluation of its productivity and quality characteristics. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019; 3(78):7-22. DOI: 10.18720/CUBS.78.1 (rus.).
14. Shmeleva E.V. Modern technologies in construction: Robotic brick laying. *Series "Construction": collection of articles of undergraduates and graduate students. In 2 volumes*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2020; 366-373. (rus.).
15. Shagina E.S. Robotics as a method of improving the safety construction production. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 6(21):128-147. (rus.).
16. Bulgakov A.G., Gerner I., Kaden R. *Research and practical examples of the production organization and robots use in the construction industry*. Moscow, All-Russian State Scientific Research Institute for Problems of Scientific and Technological Progress and Information in Construction, 2008; 1:48. (rus.).
17. Tselishev O.V., Munasyrov R.A. Brickling process automation. *Modern High Technologies*. 2014; 1:56-61. (rus.).

18. Koroed P.S., Shirokov L.A. Improving the efficiency of construction and installation works on the basis of the introduction of robotic manipulation systems. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2016; 3(119):168-171. (rus.).

19. Vilman Yu.A. Progress in construction in the construction of multi-storey residential buildings of the Unicon system is hampered by the cost of manual labor. *Success of Modern Science*. 2017; 2(6):35-38. (rus.).

20. Koroleva K.E., Vakhrushev S.I. Improving the performance of masonry. *Modern Technolo-*

*gies in Construction. Theory and Practice*. 2020; 2:425-431. (rus.).

21. Averchenkov A.V., Orekhov D.V. The choice of the optimal design of the hydraulic station using morphological methods. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2016; 20(12):80-90. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-80-90 (rus.).

22. Litvak B.G. *Expert information. Methods of obtaining and analysis*. Moscow, Radio and communications, 1982; 184. (rus.).

*Received July 11, 2020*

*Adopted in revised form on September 9, 2020*

*Approved for publication on October 30, 2020.*

**BIONOTES:** **Viktor S. Laguta** — Candidate of Engineering Sciences, general director; **Institute of Industrial Researches**; build. 4, 44 Gastello st., Moscow, 107014, Russian Federation; ID RISC: 545576; institut@imail.ru;

**Sergei V. Kalinichenko** — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Robotic Systems and Mechatronics; **Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)**; 10 Hospital lane, Moscow, 105005, Russian Federation; ID RISC: 935362; kalinichenkosv@bmstu.ru;

**Vladimir E. Kuznecov** — Candidate of Engineering Sciences, general director; **GRAS ZHILSTROY**; housing 2/build. 9, 3 Kashirskoe highway, Moscow, 115230, Russian Federation; vkuznets13@yandex.ru.

## Учет влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства

М.А. Любарская, В.С. Чекалин, И.А. Бачуринская

Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Запрос современного общества на развитие городской инфраструктуры связан с возникновением как новых потребностей, так и новых возможностей. Появление инновационных технологий позволяет элементам инфраструктуры все более соответствовать требованиям комфортности, устойчивости, безопасности. Города становятся более «умными», повышается экономическая, социальная и экологическая эффективность функционирования в них систем инженерной, энергетической, транспортной инфраструктуры. В то же время рост бытовых, сервисных и промышленных потребностей в использовании различных видов ресурсов формирует тенденцию увеличения экологического следа крупных городов. Цель исследования — обоснование необходимости и определение направлений снижения экологического следа при управлении инфраструктурой городского хозяйства.

**Материалы и методы.** Предмет исследования — взаимосвязь между функциями управления и этапами жизненного цикла инфраструктуры. Особое место уделено анализу факторов влияния систем коммунальной энергетики, водоснабжения и водоотведения, обращения с коммунальными отходами на экологический след крупных городов. Использовано сочетание позитивистской и феноменологической философии, что проявилось в обосновании полученных результатов на базе как мнений российских и зарубежных экспертов, так и статистических данных.

**Результаты.** Полученные результаты включают определение направлений негативного влияния элементов инфраструктуры городского хозяйства на величину экологического следа и уровень экологической безопасности, а также разработанные на их основе предложения по этапам и мероприятиям, влияющим на минимизацию экологического следа развития инфраструктурных систем городского хозяйства с учетом фазы жизненного цикла объекта инфраструктуры.

**Выводы.** В качестве обобщенного критерия социально-экономической оценки деятельности систем инфраструктуры городского хозяйства целесообразно ввести количественный показатель, отражающий уровень экологического следа от их деятельности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инфраструктура городского хозяйства, управление, экологический след, экологическая безопасность, жизненный цикл

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Любарская М.А., Чекалин В.С., Бачуринская И.А. Учет влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1461–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472

## Environmental footprint and its influence in the context of urban economy management

Maria A. Liubarskaia, Vadim S. Chekalin, Irina A. Bachurinskaya

Saint Petersburg State University of Economics (SPbSUE); Saint-Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** New needs and opportunities boost demand for development of urban infrastructure in a contemporary society. The emergence of innovative technologies enables infrastructural elements to better meet the requirements of comfort, sustainability, and safety. Cities are getting “smarter”, as they constantly improve the economic, social and environmental efficiency of their utility, power supply, and transport systems. In the meantime, growing private, industrial and service demands for versatile resources set the trend for bigger environmental footprints in big cities. The mission of this research project is to substantiate the need for and to identify methods of reducing environmental footprints in the course of urban infrastructure management.

**Materials and methods.** The subject of this research project is the correlation between management functions and stages of the life cycle of urban infrastructure. Special focus is placed on the analysis of the influence produced by urban power grids, water supply and sewage networks and urban waste treatment on environmental footprints of big cities. A combination of positivistic and phenomenological philosophies is employed for this purpose; their influence manifests itself in the substantiation of findings, arising out of the opinions expressed by Russian and foreign experts, and statistical data.

**Results.** The findings represent sources of negative influence of infrastructural elements on the scale of environmental footprints and environmental safety levels, as well as suggestions concerning stages and actions contributing to minimization of environmental footprints of developing infrastructural systems with regard for the current stage in the lifecycle of an infrastructural facility.

**Conclusions.** A quantity index, demonstrating the environmental footprint of infrastructural facilities in operation, can be introduced as a summarized criterion for the socio-economic assessment of operation of infrastructural systems in urban economies.

**KEYWORDS:** infrastructure of urban economy, management, environmental footprint, environmental safety, lifecycle

**FOR CITATION:** Liubarskaia M.A., Chekalin V.S., Bachurinskaya I.A. Environmental footprint and its influence in the context of urban economy management. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1461-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие человечества сопровождается возникновением множества социально-экологических проблем, таких как снижение доступности природных ресурсов, утрата биоразнообразия, деградация почв, загрязнение окружающей среды, массовая миграция людей в города [1]. Несмотря на наличие международных целей устойчивого развития, планирование мероприятий по совершенствованию инфраструктуры городского хозяйства в различных регионах до сих пор проводится без учета оценки тенденций изменения экологического следа.

Устойчивое развитие определяется как процесс удовлетворения потребностей нынешнего поколения без снижения способности удовлетворять будущие потребности [2, 3]. В этих условиях планы развития городов должны учитывать экономические и социальные аспекты, сохраняя при этом естественный баланс и стабильность основных природных процессов. Проблемы перехода к устойчивому развитию не утратили свою актуальность со времен первого доклада Римского клуба, в котором отмечалось, что все современные социально-экологические процессы связаны с последствиями бесконечного роста на конечной планете [4]. Решение серьезной экологической проблемы снижения качества воздуха, воды и почвы является основополагающим для обеспечения долгосрочной экологической безопасности жизни в городах. Этот подход должен иметь важное значение для органов власти и экспертов, ответственных за городское планирование и пространственное развитие. Задачи реализации концепции экологической безопасности и устойчивого развития связаны с уровнем инфраструктурного обеспечения городского хозяйства, который может быть достигнут без серьезной деградации и необратимых изменений в окружающей среде, но требует значительных инвестиций и «умного» управления.

Следует отметить, что экологический след служит важным инструментом определения уровня экологической безопасности для отдельных городов и регионов. Основываясь на анализе компонентов экологического следа, которые удовлетворяют основные потребности человечества в различных видах ресурсов, рядом исследователей была проведена оценка состояния экологической безопасности крупных городов по двум аспектам: состояние здоровья населения и экологический риск. Результаты изложены в работах [5–7]. Биоемкость и экологиче-

ский след инфраструктуры городов постепенно увеличиваются. Разница в структуре возобновляемых источников энергии между городскими и сельскими районами почти исчезла. Потребление ресурсов сосредоточено в городах с большим потоком людей, материалов и информации. Дефицит биоемкости и давление на окружающую среду возросли, а экологические риски увеличились. Рост числа городов с уровнем риска выше среднего означает увеличение числа «горячих точек» для управления развитием инфраструктуры. Состояние экологической безопасности в городах изменяется с относительно небезопасного и слабо неустойчивого на небезопасное и крайне неустойчивое. Существует необходимость в защите природных ресурсов, сокращении потребления и повышении экологической безопасности и устойчивости крупных городов.

Анализ экологического следа является эффективным методом оценки способности крупных городов участвовать в региональном экологическом устойчивом развитии. Многие крупные города имеют уязвимые экосистемы. Китайские исследователи [8] провели анализ экологического следа и оценку экологической безопасности 14 районов на о-ве Чжоушань (провинция Чжэцзян, Китай) в 2010, 2013 и 2015 гг. Модель регрессии частичных наименьших квадратов была использована для изучения факторов, влияющих на пространственные и временные различия в экологической безопасности в окрестностях острова, и для оптимизации его экологического устойчивого развития. Результаты показывают, что величина экологического следа на душу населения о-ва Чжоушань сократилась с 7,4 глобальных гектаров в 2010 г. до 4,7 глобальных гектаров в 2015 г., однако в течение всего периода исследования экологический след на душу населения оставался выше, чем биоемкость на душу населения во всех районах. Хотя экологическая безопасность острова постепенно улучшается, по-прежнему существуют значительный экологический дефицит и экологическое давление. Для повышения экологической безопасности крупных городов следует оптимизировать режим городского развития, развивать возобновляемые источники энергии, защищать экологически ценные земли, улучшать масштабы и качество городских зон и транспортной инфраструктуры, а также промышленные и потребительские структуры жителей.

Исследования С. Нафаниэля и С.А. Кана [9] демонстрируют, что интенсивное развитие инфра-

структуры, прежде всего, использующей невозобновляемые источники энергии, вносит значительный вклад в ухудшение состояния окружающей среды в крупных городах. Это говорит о том, что урбанизация осуществляется за счет повышения давления на окружающую среду. Дальнейшие результаты показывают устойчивую связь между урбанизацией и увеличением экологического следа из-за повышения потребности в ресурсах и образования отходов в крупных городах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка экологического следа включает в себя методику расчета площади биологически продуктивной земли или водной поверхности, необходимой для поддержания определенного уровня жизни человека, населенного пункта или страны. При этом учитываются преобладающие технологии и методы управления ресурсами в процессе производства товаров и оказания услуг, а также последующего обращения с отходами. Единицей учета экологического следа и биоемкости в рамках национальных счетов является глобальный гектар (гга).

Матрица оценки экологического следа включает пять основных видов использования биологически продуктивной земли или водной поверхности (пахотные угодья, как источник продовольствия; пастбища, как основа животноводства; лесные массивы, как источник строительных материалов; рыбопромысловые зоны, как источник морепродуктов; территории жилой и промышленной застройки, как основа жизнедеятельности населения в городах), распределенных по пяти основным компонентам потребления (обеспечение потребностей в пище, потребительских товарах, услугах, жилье, мобильности). Функционирование инфраструктуры городского хозяйства направлено на реализацию трех из пяти компонентов потребления, обеспечивая потребности населения в услугах, жилье и мобильности. Соответственно, от методов ее развития в значительной степени зависит величина экологического следа города. Поэтому определение влияния развития инфраструктуры городского хозяйства на величину экологического следа посредством сбора вторичной информации по различным странам и ее сравнительного анализа представляется важнейшим элементом методологии данной работы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

С точки зрения экологического следа, согласно данным Global Footprint Network<sup>1</sup>, Россия находится в группе стран с резервом биоемкости (когда потенциал биоемкости превышает экологический след).

<sup>1</sup> Global Footprint Network. Open Data Platform. URL: [https://data.footprintnetwork.org/?\\_ga=2.135268985.938805985.1594634694-1538938247.1594634694#/](https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.135268985.938805985.1594634694-1538938247.1594634694#/)

Эти страны также называют экологическими донорами. Под биоемкостью понимается способность экосистем восстанавливать то, что бытовая и промышленная деятельность человечества потребляет из экосистем. Биоемкость конкретной территории отражает ее способность восстанавливать то, что требуется людям. Следовательно, биоемкость — это способность экосистем производить биологические материалы, используемые людьми, и поглощать отходы, образующиеся в результате их жизнедеятельности, в соответствии с существующими схемами управления и преобладающими технологиями. Биоемкость может варьироваться из года в год под воздействием изменения климатических факторов и методов управления ресурсами. В национальных счетах экологический след и биоемкость территории рассчитываются путем умножения фактической физической площади на коэффициент урожайности и поправочный коэффициент эквивалентности. Результаты анализа последних доступных данных представлены в табл. 1.

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что Россия, благодаря громадной территории, обладает значительным резервом биоемкости. Как отмечается в работе [10], около 70 % регионов со средней величиной биоемкости и 100 % регионов с низкой биоемкостью имеют нехватку ресурсов. Самый острый дефицит биоресурсов приходится на высоко урбанизированные города, что и подтверждается расчетами, так, на долю Москвы приходится 26,005 %, на долю Санкт-Петербурга — 7,077 % дефицита природного капитала. При этом регионы с низкой биоемкостью, в состав которых входят крупные города, имеют большой экологический след. Среди таких регионов Санкт-Петербург занимает лидирующее место (7,3 гга) [10].

Крупные города, являясь движущей силой региональной экономики, также представляют серьезную угрозу для окружающей среды из-за большого потребления ресурсов и интенсивного выброса загрязняющих веществ. Экоиндустриальное развитие, включая более чистое производство, обмен биопродуктами или отходами, а также совместное использование инфраструктуры, служит ключом к повышению качества и устойчивости окружающей среды городов [11]. Тем не менее выбор методов развития инфраструктуры городского хозяйства — важная задача, поскольку материальные и энергетические потоки, функционирующие в рамках данной инфраструктуры, образуют сложные сочетания и оказывают многофакторное влияние на экологическую безопасность и экологический след крупных городов [12–14]. Вода и невозобновляемые ресурсы — главные материалы для поддержания бытовой, промышленной и коммерческой деятельности в городах редко рассматриваются в контексте воздействия на окружающую среду. Таким образом, данное исследование отображает реальную картину используемых ресурсов, включая

**Табл. 1.** Группировка стран по уровню соотношения между биологической продуктивностью и экологическим следом (выборка по европейским странам)<sup>1</sup>

**Table 1.** The breakdown of countries by the value of the “biological productivity to environmental footprint” ratio (sampling made across European countries)<sup>1</sup>

Группа стран с резервом биоемкости Group of countries having surplus biological capacities		Группа стран с дефицитом биоемкости Group of countries having insufficient biological capacities	
Название страны The country	Величина резерва, % Surplus value, %	Название страны The country	Величина дефицита, % Deficit value, %
Финляндия / Finland	102	Бельгия / Belgium	696
Швеция / Sweden	48	Нидерланды / The Netherlands	487
Российская Федерация Russian Federation	35	Италия Italy	371
Эстония / Estonia	35	Швейцария / Switzerland	362
Латвия / Latvia	34	Великобритания / The UK	301
Норвегия / Norway	32	Португалия / Portugal	225
		Германия / Germany	199
		Испания / Spain	194
		Польша / Poland	122
		Чехия / The Czech Republic	115
		Австрия / Austria	107

энергетические, водные и невозобновляемые ресурсы, чтобы проиллюстрировать фактическое воздействие на окружающую среду крупных городов.

Необходимо также помнить о влиянии деятельности человека, как потребителя услуг предприятий инфраструктурных систем городского хозяйства, на уровень экологического следа. Во многих работах, посвященных экологическому следу<sup>1</sup> [10, 12], отмечается, что деятельность человека вносит значительный вклад в величину экологического следа, так как продукты питания, потребляемые товары и услуги, выделяемый углекислый газ, включаются в экологический след страны. В расчет общего экологического следа включают три типа потребления:

- потребление домохозяйств;
- расходы на нужды государства;
- долгосрочные товары и услуги.

С точки зрения конечного потребления биоресурсов, основным источником экологического следа России является краткосрочное потребление домохозяйств, на долю которого приходится 71 % всего спроса на ресурсы [10]. В связи с этим можно с достоверностью утверждать, что поведение потребителей влияет на экологический след конкретного региона и страны. Среди категорий потребления товаров и услуг наибольший удельный вес имеет категория «отопление, вода, электричество, газ и другое топливо» (диапазон значений колеблется по регионам РФ от 10 до 50 %); второе место занимает транспорт, что имеет непосредственное отношение к сфере ЖКХ. Вклад данного показателя в разрезе регионов может достигать 30 % [10]. Данные пока-

затели наиболее значимы для крупных городов, так подушевой экологический след Санкт-Петербурга в категории «отопление, вода, электричество, газ и другое топливо» составляет 1,36 из 6,26 гга; транспорт — 0,69 гга, что составляет 32 %; для Москвы данный показатель — 35 %. На эти показатели значительно влияют состояние и уровень изношенности систем предоставления указанных коммунальных услуг для потребителей. Сведения по степени износа объектов инженерно-энергетического комплекса (ИЭК) г. Санкт-Петербурга представлены в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, многие из объектов инфраструктуры городского хозяйства в значительной степени изношены и требуют модернизации, реконструкции и замены. Поэтому содержание их в надлежащем техническом состоянии — одно из приоритетных направлений сокращения экологического следа Санкт-Петербурга.

Рассмотрим влияние конкретных элементов инфраструктуры городского хозяйства на экологический след города. При этом отметим, что все они оказывают жизненно важные услуги населению и экономическим субъектам, расположенным на территории города. Отличительной особенностью предприятий и организаций указанной сферы является непрерывный характер деятельности, так как без постоянной подачи электричества и воды, тепла (в зимний период) невозможно функционирование города в целом. В то же время вынужденная остановка в деятельности организаций по обращению с твердыми коммунальными отходами (ТКО)

**Табл. 2.** Данные по степени износа инфраструктуры городского хозяйства Санкт-Петербурга [15]**Table 2.** St. Petersburg urban economy infrastructure: level of depreciation [15]

№ п/п Item No.	Наименование объекта ИЭК Infrastructural facility	2010		2019	
		Ед. изм. Measurement unit	Фактический показатель Actual value	Ед. изм. Measurement unit	Фактический показатель Actual value
1	Системы теплоснабжения (включая долю тепловых сетей, нуждающихся в полной замене) Heat supply networks (including those in need of complete replacement)	%	28,6	%	68,3
2	Системы водоснабжения (включая долю сетей водоснабжения, нуждающихся в полной замене) Water supply networks (including those in need of complete replacement)	%	38,5	%	95,3
3	Системы водоотведения (включая долю сетей водоотведения, нуждающихся в полной замене) Sewage networks (including those in need of complete replacement)	%	43,5	%	82,7
4	Системы электроснабжения Power supply networks	%	19,6	%	40,5
5	Системы газоснабжения Natural gas supply networks	%	8,3	%	21,3

неминуемо ведет к резкому ухудшению санитарно-эпидемиологической ситуации в городах. Останемся на этих вопросах подробнее, учитывая реальные трудности развития данных отраслей и сфер деятельности, и факторы, влияющие на уровень экологического следа.

Развитие водоснабжения и водоотведения связано с решением двух важнейших задач: обеспечение жителей и организаций города холодной водой, в соответствии с установленным стандартом, и полноценная очистка канализационных стоков, препятствующая экологическим загрязнениям почвы и водоемов. Для решения этих задач проводится целый ряд дорогостоящих мероприятий, включая современные методы обеззараживания и утилизацию иловых осадков сточных вод. В качестве примера можно привести развитие систем водоснабжения и канализации в Санкт-Петербурге, где за последние 10–15 лет создана современная система водоснабжения и приведена в действие система утилизации канализационных стоков. Эти мероприятия обеспечивают развитие данной системы и, безусловно, снижают экологический след от ее функционирования [16].

Участники системы газоснабжения города — структуры АО «Газпром» и потребители природного газа. Потребителями являются физические лица, а также использующие газ в качестве топлива энергетические и прочие предприятия. Поэтому задача инфраструктурного развития состоит в разумной организации системы распределения газовых потоков потребителям и обеспечении их безопасности. Для повышения энергетической эффективности

в данной сфере осуществляется установка приборов учета у потребителей.

Система электроснабжения города включает сетевое хозяйство, а также теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), где одновременно вырабатываются тепловая и электрическая энергии. Большую часть электроэнергии города получают извне. Поэтому основная проблема здесь также состоит в устойчивом функционировании системы передачи электроэнергии потребителям.

Система отопления — одна из ведущих по возникновению экологического следа в крупных городах. Дело в том, что практически вся система генерации теплоснабжения находится в городах, так как тепло и горячую воду невозможно без серьезных потерь передать на значительное расстояние. Обеспечение городов теплом и горячей водой требует значительных ресурсов на генерацию и распределение. В большинстве крупных городов Российской Федерации функционирует централизованная система теплоснабжения, что вполне объяснимо климатическими особенностями страны [17]. Но сложившийся уровень централизации — чрезмерный, т.е. возникает сверхцентрализация, которая в значительной степени отдаляет производителя тепла от потребителя. В результате значительная нагрузка ложится на сетевое хозяйство. Так, протяженность магистральных тепловых сетей в Санкт-Петербурге (в одноструйном исчислении) составляет более 9 тыс. км, т.е. соответствует расстоянию до Владивостока [15]. Содержать такое трубопроводное хозяйство, находящееся в подземном пространстве, в надлежащем состоянии практически невозможно. Следстви-

ем этого являются огромные потери энергоресурсов (до 40 %) и многочисленные аварии в осенне-зимний период. При этом действующая система теплоснабжения ухудшает воздушный бассейн города и требует существенных преобразований. Одно из важных направлений — замена устаревших и модернизация существующих генерирующих устройств, направленная на повышение их производительности и снижение выбросов парниковых газов в атмосферу [18]. Одновременно целесообразно снизить уровень централизации и максимально приблизить производителей к потребителям.

### Обращение с ТКО

Инфраструктура данной сферы сложилась еще в советский период и в настоящее время функционирует даже в ухудшенном варианте. В городах производится сбор ТКО без разделения по фракциям, и практически весь объем отходов (более 90 %) без переработки свозится на полигоны, которые в значительной мере переполнены и требуют рекультивации. Такой устаревший подход привел к отчуждению значительной территории вокруг городов и существенному ухудшению экологической ситуации в результате попадания загрязняющих веществ в почву, в воздушный и водный бассейны.

Основные направления негативного влияния элементов инфраструктуры городского хозяйства на уровень экологического следа приведены в табл. 3.

Результаты исследования Ю. Фана и К. Фанга [19] показывают, что уровень и тенденции изменения экологического следа напрямую зависят от развития инфраструктуры городского хозяйства. В качестве одной из мер они предлагают формирование экоиנדустриальных парков, которые позволяют повысить экономическую, социальную и экологическую эффективность функционирования региональных систем обращения с отходами за счет промышленной синергии, и переход на принципы экономики замкнутого цикла. В настоящий момент в РФ принимаются решения о необходимости селекции ТКО и их экологически чистой утилизации. Ставится задача создания системы вовлечения отходов в производственный цикл в качестве вторичных ресурсов. Одной из важных мер в этом направлении является создание и развитие экоиנדустриальных парков, где индустриальные и энергетические отходы выступают в качестве одного из элементов промышленного симбиоза.

Что касается показателей и критериев развития системы инфраструктурных объектов городского хозяйства, то необходимо отметить, что проект Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года<sup>2</sup> раскрывает перечень

<sup>2</sup> Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <https://strategy24.ru/rf/projects/strategiya-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-i-zhilishchnokommunalnogo-khozyaystva-rossiyskoy-federatsii-na-period-do-2030-goda>

таких показателей и критериев. Так, например, задача, касающаяся непосредственно ЖКХ, связанная с повышением качества, безопасности и охвата предоставления коммунальных услуг, предполагает реализацию следующих мероприятий, которые могут влиять на минимизацию экологического следа: инвентаризация и создание новых технических стандартов; ускорение темпов модернизации и расширения инфраструктуры городского хозяйства с учетом требований по снижению величины экологического следа; увеличение доли нормативно очищенной сточной воды и сокращение накопленных объемов осадка сточных вод, программы по локальной очистке сточных вод для снижения негативного влияния на окружающую среду; формирование мониторинга индекса технического состояния объектов коммунальной инфраструктуры. При этом показателями (индикаторами), отражающими эффективность данных мероприятий, выступают показатели, связанные с долей населения во всех населенных пунктах, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения (до 2024 г. — 90,8 %, до 2030 — 91 %), а также доля населения в городах (до 2024 г. — 99 %, до 2030 г. — 91 %), что не отражает экологическую составляющую данных мероприятий.

Учитывая указанные направления, можно предложить следующие мероприятия по учету влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства.

1. Внедрение системы экологического мониторинга элементов инфраструктуры городского хозяйства, включающей показатели и критерии оценки их влияния на уровень экологического следа<sup>2</sup> [20].

2. Разработка концепции «зеленого» (экологически устойчивого) развития инфраструктуры городского хозяйства, опирающейся на международные экологические стандарты и показатели эффективности в сфере использования биоресурсов и энергии.

3. Применение наилучших доступных, в том числе «зеленых», технологий в сфере строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры городского хозяйства с повышением доли альтернативных источников энергии, минимизирующих углеродный след и образование отходов.

4. Управление процессами цифровизации в сфере оказания услуг городского хозяйства, в частности развитие «умных» технологий и осуществление цифровой трансформации как на уровне отдельных предприятий городского хозяйства, так и на уровне систем жизнеобеспечения города в целом, включая инжиниринг и реинжиниринг бизнес-процессов.

При этом важно учитывать этапы и мероприятия, позволяющие минимизировать влияние развития инфраструктурных систем городского хозяйства на уровень экологического следа на разных этапах жизненного цикла объектов инфраструктуры (табл. 4).

**Табл. 3.** Направления негативного влияния элементов инфраструктуры городского хозяйства на величину экологического следа и уровень экологической безопасности (составлено авторами)

**Table 3.** Adverse impacts produced by infrastructural elements on the scale of environmental footprint and environmental safety (compiled by the co-authors)

Элемент инфраструктуры Infrastructural element	Использование водных ресурсов Use of water resources	Использование энергоресурсов Use of energy resources	Образование отходов Waste generation	Углеродный след Carbon footprint
Система электроснабжения Power supply network	Экстенсивное использование воды в основных производственных процессах крупных ГЭС, недостаточное внимание к оптимизации использования воды во вспомогательных производственных процессах на АЭС Extensive use of water for basic processes at big HPPs; insufficient focus on optimization of water consumption for auxiliary production processes at NPPs	Низкий уровень энергетической эффективности и экологической безопасности основных производственных процессов на крупных ГЭС и АЭС, высокий уровень потерь в электрических сетях Low energy efficiency and environmental safety of principal processes at big HPPs and NPPs; high losses across grids	Отсутствие комплексной системы утилизации энергетических отходов, низкий уровень участия в промышленном симбиозе в рамках экондустриальных парков Lack of a comprehensive system of waste energy disposal; insufficient involvement in the industrial symbiosis within the framework of eco-industrial parks	Высокий уровень выбросов и низкая доля использования возобновляемых источников энергии объектами генерации High emissions and low use of renewables by power generation facilities
Система теплоснабжения Heating network	Экстенсивное использование воды при высоком уровне централизации систем теплоснабжения в крупных городах, высокий уровень потерь в тепловых сетях Extensive water use and high centralization of heating networks in big cities; high heat losses across heating networks	Дисбаланс между автономными и централизованными системами теплоснабжения, низкий КПД котельных, высокий уровень потерь в тепловых сетях Misbalance between decentralized and centralized heating networks; low efficiency of heating plants; high losses across heating networks	Отсутствие комплексной системы утилизации энергетических отходов, низкий уровень экологической безопасности использования топлива из отходов Lack of a comprehensive waste energy disposal system; low environmental safety of waste-derived fuel	Высокий уровень выбросов и низкая доля использования возобновляемых источников энергии объектами генерации High emissions and low utilization of renewables by power generation facilities
Система газоснабжения Natural gas supply network	Недостаточное внимание к оптимизации использования воды во вспомогательных производственных процессах на газопроводах и конденсаторах, газокомпрессорных и холодильных цехах Insufficient focus on optimal water use in the course of auxiliary processes underway in natural gas supply pipelines and condensate pipelines, gas compressors and refrigeration plants	Низкий уровень экологической безопасности основных и вспомогательных производственных процессов на газопроводах и конденсаторопроводах Low environmental safety of principal and auxiliary processes underway in gas and condensate pipelines	Отсутствие комплексной системы утилизации энергетических отходов Lack of a comprehensive waste energy disposal system	Низкий уровень использования биогаса в системах газоснабжения, низкие темпы развития системы использования газомоторного топлива Low use of bio-gas in natural gas supply networks; slow development of natural gas motor fuel consumption systems
Система водоснабжения и водоотведения Water supply and discharge networks	Высокий уровень утечек в сетях, низкие темпы внедрения инновационных технологий очистки сточных вод High rates of leaks in networks; slow integration of innovative wastewater treatment technologies	Низкие темпы перехода на закрытые системы ГВС Slow transition to closed-circuit hot water supply networks	Низкий уровень утилизации илового осадка сточных вод Low disposal of wastewater sludge	Низкий уровень энергетической эффективности и экологической безопасности станций аэрации Low energy efficiency and environmental safety of aeration basins
Система обращения с отходами Waste treatment system	Низкая эффективность технологий очистки filtrата на полигонах по захоронению коммунальных и промышленных отходов Low efficiency of filtrate treatment technologies at household and industrial waste landfills	Низкий уровень энергетической эффективности использования топлива из отходов Low energy efficiency and environmental safety of waste-derived fuel	Низкие темпы развития экондустриальных парков как объектов инфраструктурной утилизации коммунальных и промышленных отходов Slow development of eco-industrial parks as infrastructural facilities designated for disposal of household and industrial wastes	Отсутствие систем сбора биогаса на полигонах по захоронению коммунальных и промышленных отходов Lack of bio-gas collection systems at household and industrial waste landfills

Табл. 4. Этапы и мероприятия, влияющие на минимизацию экологического следа развития инфраструктурных систем городского хозяйства с учетом фазы жизненного цикла объекта инфраструктуры (составлено авторами)

Table 4. Stages and actions influencing minimization of environmental footprint of infrastructural development with regard for the phase stage in the lifecycle of infrastructural facilities (compiled by the co-authors)

Фаза жизненного цикла объекта инфраструктуры A stage in the lifecycle of an infrastructural facility	Участники, ответственные за минимизацию экологического следа, объектов инфраструктуры Executives responsible for minimization of the environmental footprint of infrastructural facilities			Мероприятия, влияющие на экологический след Actions influencing the environmental footprint
	Домохозяйства Households	Государственные органы власти и муниципальные власти Government and municipal authorities	Бизнес Business community	
Этапы и виды работ в рамках фазы жизненного цикла, влияющие на уровень экологического следа Stages and types of work performed at the lifecycle stage that can influence the environmental footprint	—	Государственные органы (прогнозы и контроль) Governmental authorities (forecasting and monitoring)	Заказчик (инвестор) Консультанты Генпроектировщик Customer (investor) Consultants General designer	Разработка проектной документации с учетом минимизации экологического следа Внедрение норм и технологий «зеленого» строительства и ужесточение экологической составляющей проектных проработок Development of a feasibility study with regard for minimization of the environmental footprint Introduction of “green” construction standards and technologies of and tightening of the environmental section of pre-design surveys
Предынвестиционные исследования и планирование проекта Pre-investment feasibility studies and project planning	—	Органы государственной экологической экспертизы, местные органы власти Tenderный комитет State environmental expert authorities, local authorities Tender committee	Заказчик (инвестор) Консультанты Генпроектировщик Проектировщики Customer (investor) Consultants General designer Designers	Утверждение проектной документации с учетом минимизации экологического следа Контракты на поставку оборудования, минимизирующего экологический след (альтернативные источники энергии, развитие малых элементов инфраструктуры, переход на закрытые системы и др.) Approval of the pre-design package with regard for minimization of the environmental footprint Equipment supply contracts that entail minimal environmental footprints (alternative energy sources, development of small infrastructural elements, transition to closed-circuit systems, etc.)
Проектирование Design	—	Органы государственной экологической экспертизы, местные органы власти Tenderный комитет State environmental expert authorities, local authorities Tender committee	Заказчик (инвестор) Консультанты Генпроектировщик Проектировщики Customer (investor) Consultants General designer Designers	Утверждение проектной документации с учетом минимизации экологического следа Контракты на поставку оборудования, минимизирующего экологический след (альтернативные источники энергии, развитие малых элементов инфраструктуры, переход на закрытые системы и др.) Approval of the pre-design package with regard for minimization of the environmental footprint Equipment supply contracts that entail minimal environmental footprints (alternative energy sources, development of small infrastructural elements, transition to closed-circuit systems, etc.)

Окончание табл. 4 / End of Table 4

<p>Строительство и сдача объекта Construction and commissioning of a facility</p>	<p>1. Разработка плана строительства с учетом результатов изучения рынка инновационных экологически безопасных технологий проведения строительных работ 1. Construction plan development with regard for the findings of market research of innovative environment friendly construction technologies. 2. Выбор поставщиков строительных материалов и оборудования с учетом характеристик экологической безопасности и энергетической эффективности 2. Selection of construction materials and equipment vendors with regard for environmental safety and energy efficiency specifications. 3. Контроль за соблюдением требований экологической безопасности и энергетической эффективности 3. Assurance of compliance with environmental safety and energy efficiency requirements.</p>	<p>—</p>	<p>Контроль и надзор Monitoring and supervision</p>	<p>Подрядчик Заказчик Генподрядчик Customer General contractor</p>	<p>Оптимизация графика строительства с учетом экономии ресурсов и энергии, оптимизация графика работы машин и механизмов, в том числе с использованием альтернативных источников топлива, использование технологий «умный» дом и «зеленое» строительство, цифровизация и оптимизация бизнес-процессов Применение наилучших доступных технологий утилизации отходов Optimization of the construction schedule with regard for resources and energy saving, optimization of the construction machinery schedule, including alternative fuel sources, smart house technologies and “green” construction, digitalization and optimization of business processes Utilization of best available waste disposal technologies</p>
<p>Техническое содержание, капитальный ремонт, модернизация объекта Maintenance, overhaul, modernization of the facility</p>	<p>1. Мониторинг процессов энергопотребления и принятия решений о необходимости проведения мероприятий по повышению энергетической эффективности 1. Monitoring of energy consumption and decision making on introduction of energy efficiency improvement actions. 2. Разработка и внедрение систем экологического и энергетического менеджмента 2. Development and introduction of systems of environmental and energy management. 3. Принятие решений о необходимости цифровизации отдельных производственных процессов и цифровой трансформации объекта 3. Decision making on digitalization of production processes and digital transformation of a construction facility.</p>	<p>Потребители услуг Consumers of services</p>	<p>Контроль и надзор Monitoring and supervision</p>	<p>Генподрядчик Заказчик Эксплуатирующие организации General contractor Customer Operators</p>	<p>Проведение энергетического и экологического аудита и внедрение новых технологий Формирование механизмов стимулирования энерго- и ресурсосбережения Цифровизация процессов эксплуатации, в том числе предоставление коммунальных услуг потребителю, проведение текущих и капитальных ремонтов, модернизация в целях поддержания энергетических и экологических характеристик объектов в соответствии с техническими и экологическими требованиями Energy and environmental audit and introduction of new technologies Development of motivation mechanisms for energy and resources saving Digitalization of operating processes, including provision of utility services to consumers; maintenance and overhaul, modernization of facilities to assure compliance of their energy and environmental specifications with the latest technological and environmental requirements</p>
<p>Снос и утилизация объекта Facility demolition and debris disposal</p>	<p>1. Разработка плана сноса объекта с учетом результатов изучения рынка инновационных экологически безопасных технологий 1. Demolition plan development with regard for the findings of the market research in terms of innovative environment friendly technologies. 2. Контроль за соблюдением требований экологической безопасности и энергетической эффективности 2. Monitoring of compliance with environmental safety and energy efficiency requirements.</p>	<p>—</p>	<p>Контроль и надзор Monitoring and supervision</p>	<p>Подрядные организации, эксплуатирующие организации Contractors, operators</p>	<p>Снос объектов и утилизация отходов с учетом экологических требований и минимизации экологического следа Применение наилучших доступных технологий утилизации отходов от сноса объекта Demolition of facilities and debris disposal with regard for environmental requirements and minimization of the environmental footprint Utilization of the best available debris disposal technologies</p>

Как показывает анализ данной таблицы, значительное внимание необходимо уделить бизнес-сообществу, поскольку роль данного участника в минимизации экологического следа значительна. Отметим, что все предлагаемые направления совершенствования инфраструктуры городского хозяйства связаны с существенными затратами инвестиционных ресурсов. При этом требуется соотносить размер инвестиций с прямыми и косвенными экономическими, социальными и экологическими эффектами. На наш взгляд, в качестве показателя, характеризующего экологическую составляющую, целесообразно ввести показатель экологического следа объектов инфраструктуры городского хозяйства и определить критерием снижение данного показателя, особенно для территорий крупных городов.

## ВЫВОДЫ

Подробно рассмотрена инфраструктура городского хозяйства, включая системы водоснабжения и канализации, электро- и газоснабжения, теплоснабжения и обращения с ТКО. Определены особенности их функционирования и возникающие проблемы. В то же время значительное внимание уделено вопросам экологического развития на уровне отдельных стран и регионов. Приведен показатель экологического следа от деятельности различных сфер жизнедеятельности. Установлено, что Россия имеет в целом положительный потенциал экологического развития, но ряд регионов, особенно крупные города, отличаются крайне неблаго-

приятными экологическими параметрами. Причем, значительную долю в ухудшение экологической обстановки вносят системы городского хозяйства.

В результате проведенного исследования выявлена тесная взаимосвязь между развитием систем инфраструктуры городского хозяйства и уровнем экологического следа. Показаны направления негативного влияния элементов инфраструктуры городского хозяйства на величину экологического следа. Проанализированы предлагаемые показатели и критерии влияния развития систем инфраструктуры городского хозяйства на уровень экологической безопасности в городах. Выявлена их неполнота и предложены основные направления устойчивого развития систем городского хозяйства, ориентированные на снижение экологического следа от их деятельности.

Особое внимание уделено мероприятиям, влияющим на минимизацию экологического следа развития инфраструктурных систем городского хозяйства с учетом фазы жизненного цикла объектов инфраструктуры. Установлено, что важнейшее значение имеет партнерство органов государственной власти, местного самоуправления и бизнес-сообщества по развитию объектов инфраструктуры городского хозяйства с учетом снижения экологического следа и проведения политики повышения уровня экологической безопасности.

В качестве обобщенного критерия социально-экономической оценки деятельности систем инфраструктуры городского хозяйства предлагается ввести количественный показатель, отражающий уровень экологического следа от их деятельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коробова Н.Л., Терентьев А.А. Нефинансовая отчетность как средство экологизации деятельности компаний // Россия: Тенденции и перспективы развития. 2015. № 4. С. 350–354.
2. Holden E., Linnerud K., Banister D. The imperatives of sustainable development // Sustainable Development. 2017. Vol. 25. Issue 3. Pp. 213–226. DOI: 10.1002/sd.1647
3. Holden E., Linnerud K., Banister D. Sustainable development: our common future revisited // Global Environmental Change. 2014. Vol. 26. Pp. 130–139. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.006
4. ElMassah S., Mohieldin M. Digital transformation and localizing the Sustainable Development Goals (SDGs) // Ecological Economics. 2020. Vol. 169. P. 106490. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106490
5. Albarracin G. Urban form and ecological footprint: Urban form and ecological footprint: A morphological analysis for harnessing solar energy in the suburbs of Cuenca, Ecuador // Energy Procedia. 2017. Vol. 115. Pp. 332–343. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.030
6. Baabou W., Grunewald N., Ouellet-Plamondon C., Gressot M., Galli A. The ecological footprint of Mediterranean cities: awareness creation and policy implications // Environmental Science & Policy. 2017. Vol. 69. Pp. 94–104. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.12.013
7. Bi M., Xie G., Yao C. Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China // Ecological Indicators. 2020. Vol. 116. P. 106432. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106432
8. Wu Y., Zhang T., Zhang H., Pan T., Ni X., Gridehoj A. et al. Factors influencing the ecological security of island cities: A neighborhood-scale study of Zhoushan Island, China // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 55. P. 102029. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102029
9. Nathaniel S., Khan S.A. The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 272. P. 122709. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122709

10. Боев П.А., Буренко Д.Л., Шварц Е.А., Вакер-нагель М., Дьеп А., Хэнском Л. и др. Экологический след субъектов Российской Федерации. Основные выводы и рекомендации. Всемирный фонд дикой природы (WWF). М.: WWF России, 2016. 112 с.

11. Swiader M., Lin D., Szewransky S., Kazak J.K., Iha K., Hoof J. et al. The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: A new approach for European cities // *Environmental Science & Policy*. 2020. Vol. 105. Pp. 56–74. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.12.010

12. Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Костина Н.В., Иванова А.В., Розенберг Г.С. Оценка устойчивого развития территорий с использованием экологического следа и биологической емкости // *Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем: материалы пятой Международной конференции*. 2018. С. 133–135.

13. Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Костина Н.В., Иванова А.В., Розенберг Г.С., Зибарев А.Г. Роль экологического следа и биологической емкости при оценке устойчивости территории Волжского бассейна // *Экологические проблемы бассейнов крупных рек: материалы Международной конференции*. 2018. С. 164–166.

14. Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Костина Н.В., Иванова А.В., Розенберг Г.С., Зибарев А.Г. Экологический след и биологическая емкость территории в оценке устойчивого развития региона // *Экология и природопользование: прикладные аспекты* :

мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2018. С. 192–197.

15. Чекалин В.С., Любарская М.А., Ермакова М.Ю. Энергетический комплекс крупного города: проблемы и пути развития // *Известия СПбГЭУ*. 2020. № 4 (124). С. 56–62.

16. Каменев Я.Ю. Исследование эмиссии парниковых газов от водного комплекса жилищно-коммунального хозяйства // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2 (25). С. 74.

17. Коробова Н.Л., Терентьев А.А. Человеческий фактор во внедрении энергоэффективности и снижении рисков климатических изменений в России // *Россия: Тенденции и перспективы развития*. 2017. С. 795–799.

18. Розенберг Г.С., Гелашвили Д.Б., Зибарев А.Г., Костина Н.В., Кудинова Г.Э., Саксонов С.В. и др. Формирование экологической ситуации и пути достижения устойчивого развития Волжского бассейна // *Региональная экология*. 2016. № 1 (43). С. 15–27.

19. Fan Y., Fang C. Assessing environmental performance of eco-industrial development in industrial parks // *Waste Management*. 2020. Vol. 107. Pp. 219–226. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.008

20. Ратнер С.В., Ратнер М.Д. Разработка моделей регионального экологического менеджмента в соответствии с инновационным форматом ISO 14001:2015 // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2016. № 30. С. 19–32.

Поступила в редакцию 27 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Мария Александровна Любарская** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры государственного и территориального управления; **Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ)**; 191023, г. Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 21; РИНЦ ID: 372258, Scopus: 57191414378, ORCID: 0000-0001-9843-1949; lioubarskaya@mail.ru;

**Вадим Сергеевич Чекалин** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры государственного и территориального управления; **Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ)**; 191023, г. Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 21; РИНЦ ID: 471297, ORCID: 0000-0001-9192-6770; vchekalin10@list.ru;

**Ирина Анатольевна Бачуринская** — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры государственного и территориального управления; **Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ)**; 191023, г. Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 21; РИНЦ ID: 561246, Scopus: 56674784700, ORCID: 0000-0003-2296-5869; basia@mail.ru.

## REFERENCES

1. Korobova N.L., Terent'yev A.A. Non-financial reporting as a means of greening companies' activities. *Russia: Trends and Development Prospects*. 2015; 4:350-354. (rus.).

2. Holden E., Linnerud K., Banister D. The imperatives of sustainable development. *Sustainable Development*. 2017; 25(3):213-226. DOI: 10.1002/sd.1647

3. Holden E., Linnerud K., Banister D. Sustainable development: our common future revisited. *Global Environmental Change*. 2014; 26:130-139. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.006

4. ElMassah S., Mohieldin M. Digital transformation and localizing the Sustainable Development Goals

(SDGs). *Ecological Economics*. 2020; 169:106490. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106490

5. Albarracin G. Urban form and ecological footprint: Urban form and ecological footprint: A morphological analysis for harnessing solar energy in the suburbs of Cuenca, Ecuador. *Energy Procedia*. 2017; 115:332-343. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.030

6. Baabou W., Grunewald N., Ouellet-Plamondon C., Gressot M., Galli A. The ecological footprint of Mediterranean cities: awareness creation and policy implications. *Environmental Science & Policy*. 2017; 69:94-104. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.12.013

7. Bi M., Xie G., Yao C. Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Ecological Indicators*. 2020; 116:106432. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106432

8. Wu Y., Zhang T., Zhang H., Pan T., Ni X., Grیدهoj A. et al. Factors influencing the ecological security of island cities: A neighborhood-scale study of Zhoushan Island, China. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 55:102029. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102029

9. Nathaniel S., Khan S.A. The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 272:122709. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122709

10. Boyev P.A., Burenko D.L., Shvarts Ye.A., Vakernagel' M., D'yep A., Khenskom L. et al. *Ecological footprint of subjects Russian Federation. Key findings and recommendations*. Moscow, WWF Russia, 2016; 112. (rus.).

11. Swiader M., Lin D., Szewransky S., Kazak J.K., Iha K., Hoof J. et al. The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: A new approach for European cities. *Environmental Science & Policy*. 2020; 105:56-74. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.12.010

12. Kudinova G.E., Rozenberg A.G., Kostina N.V., Ivanova A.V., Rozenberg G.S. Assessment of sustainable development of territories using the ecological footprint and biological capacity. *Innovative ap-*

*proaches to ensuring sustainable development of socio-ecological and economic systems: materials of the fifth International conference*. 2018; 133-135. (rus.).

13. Kudinova G.E., Rozenberg A.G., Kostina N.V., Ivanova A.V., Rozenberg G.S., Zibarev A.G. The role of the ecological footprint and biological capacity in assessing the sustainability of the Volga basin territory. *In the collection: Environmental problems of large river basins: materials of the International conference*. 2018; 164-166. (rus.).

14. Kudinova G.E., Rozenberg A.G., Kostina N.V., Ivanova A.V., Rozenberg G.S., Zibarev A.G. Ecological footprint and biological capacity of the territory in assessing the sustainable development of the region. *Ecology and nature management: applied aspects: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Ufa, 2018; 192-197. (rus.).

15. Chekalin V.S., Liubarskaia M.A., Yermakova M.Y. Energy complex of a large city: problems and solutions. *Izvestia SPbGEU*. 2020; 4(124):56-62. (rus.).

16. Kamenev Y.Y. Research of emission of greenhouse gases from a water complex of housing and communal services. *Engineering Journal of Don*. 2013; 2(25):74. (rus.).

17. Korobova N.L., Terent'yev A.A. The human factor in the implementation of energy efficiency and reducing the risks of climate change in Russia. *Russia: Trends and Development Prospects*. 2017; 795-799. (rus.).

18. Rozenberg G.S., Gelashvili D.B., Zibarev A.G., Kostina N.V., Kudinova G.E., Saksonov S.V. et al. Formation of the ecological situation and ways to achieve sustainable development of the Volga basin. *Regional Ecology*. 2016; 1(43):15-27. (rus.).

19. Fan Y., Fang C. Assessing environmental performance of eco-industrial development in industrial parks. *Waste Management*. 2020; 107:219-226. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.008

20. Ratner S.V., Ratner M.D. Development of models of regional environmental management in accordance with the innovative format ISO 14001:2015. *Financial analytics: problems and solutions*. 2016; 30:19-32. (rus.).

Received July 27, 2020

Adopted in revised form on September 24, 2020

Approved for publication on October 30, 2020.

**BIONOTES:** **Maria A. Liubarskaia** — Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of State and Territorial Management; **Saint-Petersburg State University of Economics (SPbSUE)**; 21 Sadovaya st., Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation; ID RSCI: 372258, Scopus: 57191414378, ORCID: 0000-0001-9843-1949; liubarskaya@mail.ru;

**Vadim S. Chekalin** — Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of State and Territorial Management; **Saint-Petersburg State University of Economics (SPbSUE)**; 21 Sadovaya st., Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation; ID RSCI: 471297, ORCID: 0000-0001-9192-6770; vchekalin10@list.ru;

**Irina A. Bachurinskaya** — Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of State and Territorial Management; **Saint-Petersburg State University of Economics (SPbSUE)**; 21 Sadovaya st., Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation; ID RSCI: 561246, Scopus: 56674784700, ORCID: 0000-0003-2296-5869; basia@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. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

### **Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

## КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

### ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

### ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение (Introduction).** Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями).

ми), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

**Материалы и методы (Materials and methods).** Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

**Результаты (Result).** В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

**Заключение (Conclusion and discussion)** содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

## КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Список литературы на русском языке** оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### **Образец:**

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

**Список литературы на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

### **Образец:**

#### **Reference**

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

### **Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:**

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

**Образец:**

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

**Образец:**

Puzyrev 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](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](http://Citethisforme.com).

# ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>...

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна

**Аннотация** (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

**Введение:** приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

**Материалы и методы:** описание применяемых информационных материалов и научных методов.

**Результаты:** развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

**Выводы:** аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

**Ключевые слова:** 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

**Благодарности** (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>... на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

<sup>2</sup> 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 (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001**

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 4 4 5 2 5 0 0 0

КБК 0 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 2020 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 (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001**

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 4 4 5 2 5 0 0 0

КБК 0 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 2020 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](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

