

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал  
по строительству и архитектуре

Том Vol. 16 Выпуск Issue 3/2021

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction  
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 3  
2021**

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

Сквозной номер 149

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 3  
2021**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>      | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).<br>Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.                                                                                                                                       |
| <b>ISSN</b>                                                   | 1997-0935 (Print)<br>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),<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26;<br>Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ»,<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1. |
| <b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>           | Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН),<br>Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Издатель:</b>                                              | ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.<br>Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                          |
| <b>Типография:</b>                                            | Типография Издательства МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8.<br>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> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Тел.:</b>                                                  | (495) 287-49-14, доб. 23-93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписка и распространение:</b>                            | Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке.<br>Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989.<br>Цена свободная.                                                                                                                                                                              |
| <b>Подписан в печать</b>                                      | 29.03.2021.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписан в свет</b>                                        | 31.03.2021.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,05. Тираж 100 экз. Заказ № 59 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## Главный редактор

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

## Заместители главного редактора

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

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

## Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** Анна Александровна Дядичева

**Редактор:** Татьяна Владимировна Бердникова

**Корректор:** Любовь Владимировна Светличная

**Дизайн и верстка:** Ольга Григорьевна Горюнова

**Перевод на английский язык:** Ольга Сергеевна Конакова

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

## Председатель редакционного совета

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

## Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Рашид Абдуллович Мангушев**, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Павел Александрович Хаванов**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогоснабжения 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)<br>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;<br>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<br>Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>    |
| <b>Printing House:</b>                                                       | Printing house of the Publishing house MISI – MGSU<br>building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337<br>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> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@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>                                                  | 29.03.2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

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

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

## Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Stanislav Jemioło**, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Republic of Poland

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

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

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

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

**Roode Liias**, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

**Miroslav Premrov**, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

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

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

## Editorial team of issues

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

**Editor:** *Tat'yana V. Berdnikova*    **Layout:** *Ol'ga G. Goryunova*

**Russian-English translation:** *Ol'ga S. Konakova*

## Chairman of the Editorial Board

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

## Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Vladimir I. Travush**, CJSC "Gorproject", Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

*Т.В. Иванцык, А.М. Салимов*

**Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований. . . . . 265**

*Ю.Г. Страшнова, Л.Ф. Страшнова, Т.И. Жукова*

**Оценка градостроительного развития социальной инфраструктуры на основе интегрального рейтинга районов (на примере 25 районов Москвы) . . . . . 279**

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

*Е.А. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, А.Е. Мойсейчик, А.М. Язневич, А.А. Яковлев*

**Деформирование стальных стержней периодического профиля с эксплуатационными повреждениями . . . 294**

*Л.Ю. Ступишин, М.Л. Мошкевич*

**Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии . . . . . 306**

*И.С. Аксенов, А.П. Константинов*

**Упрощенный подход к моделированию уплотнителя для прочностного расчета оконных конструкций . . . 317**

*В.С. Уткин, Л.А. Сушев, С.А. Соловьев*

**Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке. . . . . 331**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Ю.И. Густов, И.О. Махов*

**Определение класса стали металлических конструкций по малогабаритным образцам . . . . . 340**

*А.А. Аскадский, С.В. Мацеевич, Т.А. Мацеевич*

**Подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, применяемых в строительстве. . . . . 347**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*А.Э. Тен, Н.Т. Джумагулова, Ю.В. Брянская*

**Оценка влияния заиливания трубопровода на его пропускную способность . . . . . 360**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*А.А. Кулаков, А.Ф. Филатова*

**Вакуумирование активного ила как способ интенсификации процессов его седиментации. . . . . 370**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 381**

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov*

**The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies . . . . . 265**

*Yulia G. Strashnova, Lyudmila F. Strashnova, Tatyana I. Zhukova*

**Assessment of social facilities' urban development based on the integral rating of districts  
(case study of 25 districts of Moscow). . . . . 279**

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

*Evgeny A. Moiseichik, Yuri V. Vasilevich, Aliaksandr E. Maiseichyk, Aliaksei M. Yaznevich, Aliaksandr A. Yakauleu*

**Deformation steel rods periodic profile with operational damages . . . . . 294**

*Leonid Yu. Stupishin, Mariya L. Moshkevich*

**Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels . . . . . 306**

*Ivan S. Aksenov, Aleksandr P. Konstantinov*

**A simplified approach to the window gasket modeling for window strength calculation . . . . . 317**

*Vladimir S. Utkin, Leonid A. Sushev, Sergey A. Solovov*

**Improvement of methods for pile foundations design on settlement . . . . . 331**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Yuri I. Gustov, Igor O. Makhov*

**Determination of the class of steel by small samples . . . . . 340**

*Andrey A. Askadskii, Sergey V. Matseevich, Tat'yana A. Matseevich*

**Selection of structural elements of cross-linked polymers used in construction . . . . . 347**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Andrey E. Ten, Nazira T. Dzhumagulova, Yuliya V. Bryanskaya*

**Impact assessment of silting on pipeline capacity . . . . . 360**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Artem A. Kulakov, Alina F. Filatova*

**Intensification of activated sludge sedimentation processes by means of vacuuming . . . . . 370**

**Requirements for research paper design . . . . . 381**

## 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).

## Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований

Т.В. Иванцык<sup>1</sup>, А.М. Салимов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрен один из объектов культурного наследия, участвующий в формировании архитектурного облика усадьбы Мусиных-Пушкиных на пересечении Доброслободской и Спартаковской улиц в Москве (ныне комплекс зданий Московского государственного строительного университета), в частности, ограда ансамбля, связанная с красной линией Спартаковской улицы. Будучи памятником архитектуры федерального значения, это сооружение в настоящее время сохранилось после ремонтно-реставрационных работ советского периода, однако оно по-прежнему важно в контексте созданного в эпоху классицизма ансамбля, поскольку когда-то включало парадные ворота, ведущие на территорию обширной усадьбы. Цель исследования — проследить историю существования усадебной ограды, выявить более поздние включения в ее объемно-пространственную структуру и, как следствие, предложить графическую реконструкцию ее первоначального облика.

**Материалы и методы.** Изучение памятника основано на методе комплексного источниковедения, который включает поиск и анализ источников и литературы, натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов и обмерными работами, химико-технологический анализ строительных и отделочных материалов. Используя сравнительный метод, данный объект рассмотрен вместе со стилистически и типологически близкими постройками.

**Результаты.** Выявлена строительная периодизация памятника, датированы его существующие объемы, обнаружены и изучены первоначальные элементы постройки и выделены более поздние напластования, что позволило разработать графическую реконструкцию сооружения на начальный период.

**Выводы.** Предложенная реконструкция памятника является результатом комплексных исследований, которые дают возможность воссоздать утратившее в процессе существования свои первоначальные формы ограждение. В итоге оно обогатит и сделает более целостным один из интереснейших усадебных ансамблей Москвы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** усадебный комплекс на Разгуляе, усадьба Мусиных-Пушкиных в Москве, Мусиных-Пушкины, М.Ф. Казаков, классицизм, Спартаковская улица, ограда

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 265–278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278

## The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies

Timur V. Ivantsyk<sup>1</sup>, Alexey M. Salimov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The article examines an object of cultural heritage that is involved in forming the architectural look of the Musin-Pushkin Estate at the intersection of Dobroslobodskaya and Spartakovskaya Streets in Moscow (now a group of buildings of the Moscow State University of Civil Engineering) — the ensemble fence connected with the red line of Spartakovskaya Street. As a listed building of federal importance, the monument is currently preserved as repaired and restored in the So-

viet period, but it is still important as a part of the ensemble created in the era of classicism, since it once included the front gate opened into the vast estate. The main objective of this article is to trace the history of the estate fence, to identify later inclusions in the building mass and, as a consequence, to propose a graphic reconstruction of its original look.

**Materials and methods.** The study of the monument is based on the method of comprehensive source study, which includes the search and analysis of sources and literature, field studies, including probing, pit sampling and measuring work, as well as chemical development study of building and finishing materials. Using the comparative method, this object was studied among stylistically and typologically similar buildings.

**Results.** As a result of the research, the construction periodization of the monument was identified, its existing volumes were dated, the initial elements of the building were discovered and studied, and later strata were identified, which made it possible to develop a graphic reconstruction of the building for the initial period.

**Conclusions.** The proposed reconstruction of the monument has resulted from the comprehensive studies allowing to reconstruct the fence that has lost the original architectural form throughout its existence. As a result, the fence will enrich one of the most fascinating manor ensembles in Moscow providing its completion.

**KEYWORDS:** manor complex on Razgulay, Musin-Pushkin Estate in Moscow, Musin-Pushkin, M.F. Kazakov, classicism, Spartakovskaya Street, fence

**FOR CITATION:** Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):265-278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс зданий Московского государственного строительного университета — один из архитектурных ансамблей Москвы эпохи классицизма, созданный в начале XIX в. стараниями известного вельможи екатерининского времени, коллекционера и ученого Алексея Ивановича Мусина-Пушкина. Согласно сложившейся историографической традиции, автором этого комплекса мог быть М.Ф. Казаков или зодчий, «близкий его кругу» [1]. За время своего существования ансамбль на Разгуляе претерпел немало изменений, что способствовало внедрению в структуру классицистической усадьбы ряда дисгармонирующих объемов и утрате отдельных элементов комплекса.

К числу последних может быть отнесена и расположенная по красной линии Спартаковской (ранее — Елоховской) улицы ограда, композиционно объединяющая главный корпус и северный флигель (рис. 1, 2). Ограждением эту часть комплекса можно назвать с оговоркой, поскольку в его состав входят

только три столба. При этом два типологически близких восточных<sup>1</sup> пилонообразных столба служат опорами для крепления решетчатых воротных полотнищ, а третья, примыкающая к северо-восточному углу главного корпуса опора, похожа на стенку. Она наиболее репрезентативна, так как практически на всю высоту покрыта рустом, увенчана сложнопрофилированным карнизом, и со стороны улицы в ее плоскости устроена полуциркульная ниша. В итоге типологически и композиционно этот пилон оказывается увязан с западной оконечностью северного флигеля.

<sup>1</sup> Границы усадьбы не ориентированы точно по сторонам света, поэтому в сложившейся ситуации, дабы не отягощать текст лишними сложностями, расположенное по Спартаковской улице ограждение, которое в реальности фиксируется по линии северо-восток — юго-запад, мы условно связываем с северной границей домовладения. Тот же принцип будет действовать и по отношению к другим сторонам комплекса.



Рис. 1. Москва. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Существующее состояние. Фото 2019 г.  
Fig. 1. Moscow. The fence of the Musin-Pushkin Estate on Spartakovskaya Street. Existing condition. Photo, 2019



**Рис. 2.** Москва. Воротные столбы ограды усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Существующее состояние. Фото 2019 г.

**Fig. 2.** Moscow. Gate posts, the fence of the Musin-Pushkin Estate on Spartakovskaya Street. Existing condition. Photo, 2019

На фоне западного пилона воротные столбы примитивны по архитектуре. Более изящна металлическая решетка с концентрирующимися в верхней части декоративными элементами, но и ее облик во взаимосвязи с опорами ворот легко вписывается в псевдоклассицистическую стилистику советского времени. Между тем не стоит забывать, что рассматриваемые конструкции располагаются на месте парадного въезда, который в прошлом вел на территорию обрамленного различными постройками усадебного двора.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование данного памятника проведено с использованием комплекса методов, направленных на изучение объекта культурного наследия, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Особое внимание уделено архитектурно-археологическому направлению, анализу выявленных артефактов, фиксации их объемных параметров и моделированию недостающих деталей постройки. Материалами стали выявленные в ходе натурных изысканий подлинные элементы памятника, что и легло в основу концептуального решения и графической реконструкции рассматриваемого элемента ансамбля.

В рамках комплексного подхода было проведено изучение в следующих направлениях:

Осуществлен поиск и выполнен анализ источников и литературы относительно исследуемых конструкций и ансамбля усадьбы в целом.

Выполнены натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов, обмерными работами и химико-технологическим изучением строительных и отделочных материалов.

Используя сравнительно-исторический метод, подобраны стилистически и типологически близкие аналоги северному участку ограды усадьбы Мусиных-Пушкиных.

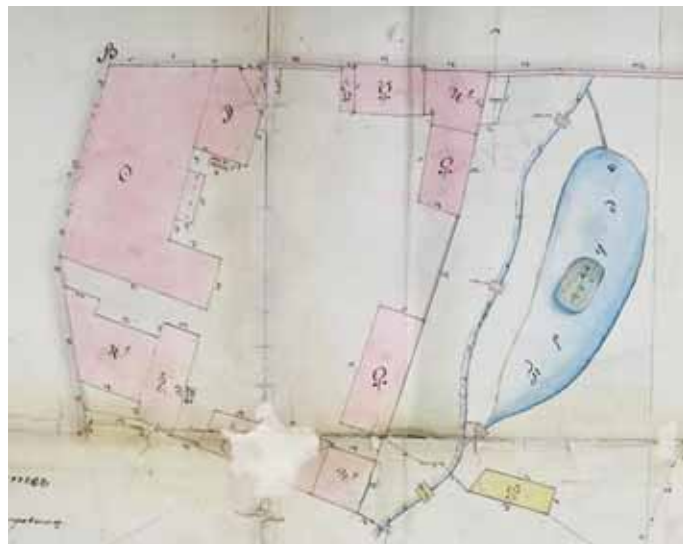
Подготовлена графическая реконструкция памятника.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить, что каменное ограждение появилось по северной границе усадьбы Мусиных-Пушкиных, вероятно, после завершения северного флигеля, т.е. в первое десятилетие XIX в., скорее, в рамках его второй половины, потому что к 1804 г. северный флигель еще не был завершен [2].

Впервые на имеющихся в нашем распоряжении чертежах ограда фиксируется на плане 1824 г., но здесь она показана просто как прямолинейный, каменный участок стены, лишенный ворот (рис. 3) [3]. Однако, поскольку не имеют проездов (проходов) и другие участки ограждения на плане 1824 г., есть основание полагать, что к 1824 г., когда появился этот чертеж, в структуре северного ограждения ворота все же были. Добавим, что на плане 1824 г. указана протяженность каменной ограды — около 8,5 сажен (свыше 18 м).

Следующий по времени источник, где фиксируется эта ограда и даже ворота в ее составе — это картина 1847 (1849) г. (рис. 4) [4]. Отметим, что изображенные здесь восточные столбы в целом выше существующих в настоящее время опор, хотя такой их облик можно было бы отнести на счет некоторого художественного домысла автора (Г.В. Барановского). Тем не менее эта фиксация находит подтверждение благодаря фотоснимку первой половины — середины 1880-х гг., где все столбы ограждения, похоже, по-



**Рис. 3.** Москва. «План дому графини Екатерины Алексеевны Мусиной Пушкиной, состоящему в Басманной части 3-го квартала под № прежним 312-м, а ныне 297-м». 5 февраля 1824 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2)

**Fig. 3.** Moscow. “The plan of the house of Countess Ekaterina Alekseevna Musina Pushkina located on Basmannaya part of the 3rd quarter under the former number of 312th, and now 297th”. February 5, 1824. Central State Archive of Moscow. Fund T-1. L. 2 File 173 (437/291; 2)



**Рис. 4.** Г.В. Барановский. Москва. Основной корпус Второй Московской гимназии на площади Разгуляй. 1847 (1849) г. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. ООО «Арсимум». М., 2011

**Fig. 4.** G.V. Baranovsky. Moscow. The main building of the Second Moscow Gymnasium on the Razgulyay Square. 1847 (1849). MGSU Archive. The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds. T. 1. Arsimum LLC. Moscow, 2011

казаны близкими по высоте [5]. Следует также отметить, что восточная секция ограды примыкает на этой фотографии прямо к западному фасаду северного флигеля, т.е. так, как это выполнено сегодня.

Существенные изменения в составе ограждения произошли, вероятно, в начале 1910-х гг., когда на территории усадьбы появилось новое трехэтажное учебное здание, что, возможно, повлекло за собой некоторые корректировки в других частях домовладения. Дело в том, что фотографии и планы 1910-х гг. фиксируют одноэтажную пристройку к западной

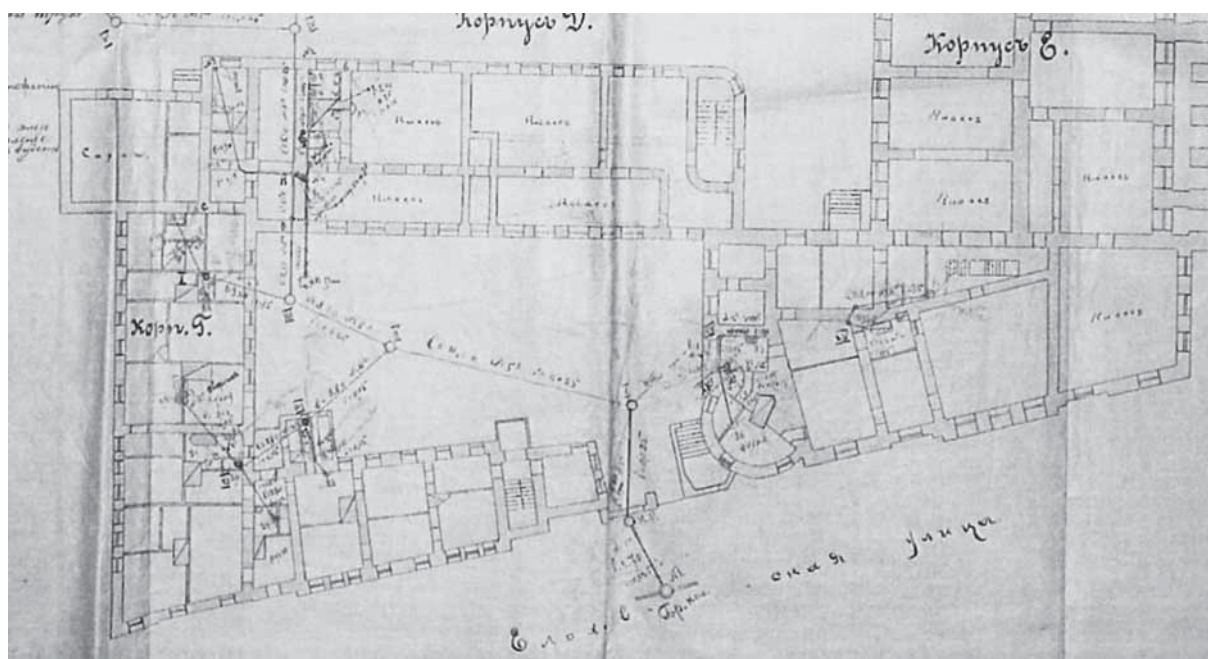
стене северного флигеля (рис. 5) [6], которой еще не было в самом начале XX в. К примеру, на чертеже, относящемся, по всей видимости, к первому десятилетию XX в., отмечены два воротных столба, к которым с двух сторон примыкают одинаковые по протяженности прясла ограды [7]. Иначе фиксирует это ограждение план 1913 г. (рис. 5), где на месте восточного прясла ограды (к востоку от ворот) мы видим каменную пристройку. А еще одна каменная стенка в начале 1910-х гг. была установлена там, где до этого находились ворота. Наконец, ворота в 1913 г., по-

хоже, вообще не были включены в уцелевшую часть ограды: между западной и восточной опорами на чертеже 1913 г. показано только металлическое заполнение [8]. Отметим, что после перестройки в начале 1910-х гг. ограждения воротные столбы изменили свое местоположение. В этот период могла измениться и конфигурация крайней западной опоры.

Дополнительным аргументом в пользу того, что в начале 1910-х гг. ограда была кардинальным образом реформирована, служат чертежи 1932 и 1958 гг., фиксирующие западную пристройку к северному флигелю и сократившуюся по длине ограду. И если план первой половины 1930-х гг. отмечает ограждение достаточно обобщенно [9], то чертеж конца 1950-х гг. обозначает восточную половину северной ограды в качестве каменной стенки, а прясло к за-

паду от воротного проезда фиксирует в виде металлического заполнения, примыкающего к опорам с востока и запада [10]. Важно также отметить, что на советских планах 1932 и 1958 гг. воротный проезд показан, чего, как указывалось ранее, не было в 1913 г.

В конце 1950-х гг. западная пристройка к северному флигелю была разобрана, о чем свидетельствуют его поэтажные планы, выполненные в 1966 г. [11], поэтому есть основание полагать, что в конце 1950-х гг., по крайней мере, воротные опоры могли сложить заново. Тогда же, по-видимому, было изготовлено и новое металлическое заполнение или, во всяком случае, часть его по более раннему образцу, возможно, сохранившемуся в западной части ограждения.



**Рис. 5.** Москва. Вторая Московская гимназия (усадьба Мусиных-Пушкиных). Общий план северной половины комплекса и планы строений на уровне первого этажа. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

**Fig. 5.** Moscow. Second Moscow Gymnasium (Musin-Pushkin Estate). General plan of the northern side of the complex and ground-floor plans of buildings. 1913. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2 File 636. L. 2

Следующие преобразования постройки относятся к 1987 г., о чем свидетельствует смета, где набор предполагаемых работ недвусмысленно говорит о создании нового ограждения [12]. Помимо общестроительных работ, в этом же документе присутствует раздел «Изготовление белокаменного карниза на пилонах ограды по 1-му корпусу», в котором наличествуют такие пункты, как «заготовка профилированных кирпичей с укладкой на место», «заготовка белокаменных профилированных деталей с укладкой на место из 2-х рядов белого камня толщиной 22 см», «укладка кирпичных деталей на столб ворот для обтекаемости поверхности», «зажелезнить верхнюю

часть столба ворот для обтекаемости поверхности», «обмазка известковым раствором столба ворот по новому кирпичу», «окраска перхлорвиниловыми красками ранее окрашенных поверхностей» [13], что так же свидетельствует о масштабной замене более ранних элементов. Этот вывод находил подтверждение и при визуальном знакомстве с памятником, но многое расставило по своим местам натурное изучение ограждения, сопровождавшееся устройством необходимого количества шурфов и зондажей. Они подтвердили результаты историко-архивных и библиографических работ. Было установлено, что существующие в настоящее время все столбы ограды

сложены из советского кирпича на цементном растворе, правда, поставлены они на более ранние фундаментные конструкции, что, очевидно, было продиктовано стремлением по возможности близко воссоздать объемно-пространственную композицию памятника. Однако, говоря об утратах, следует сказать, что в процессе исследований удалось выяснить, что к досоветскому периоду принадлежат металлические, кованые решетки, заполняющие западный и восточный пролеты ограды. А во время архитектурно-археологических работ удалось обнаружить белокаменные элементы декора, такие как фрагмент полуколонны и деталь венчающего карниза (рис. 6, 7). К анализу этих элементов обратимся позже, а прежде наметим строительную периодизацию данного сооружения, в рамках которой можно выделить три периода.



**Рис. 6.** Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Фрагмент белокаменной полуколонны, обнаруженный при архитектурно-археологических исследованиях на месте ограды, расположенной по Спартаковской улице. Фото Т.В. Иванцыка. 2019 г.

**Fig. 6.** Moscow. The Musin-Pushkin Estate. Fragment of a white-stone semi-column, found during architectural and archaeological research at the site of the fence located on Spartakovskaya Street. Photo by T.V. Ivantsyk. 2019



**Рис. 7.** Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Фрагмент белокаменного карниза, обнаруженного при архитектурно-археологических исследованиях на месте ограды, расположенной по Спартаковской улице. Фото Т.В. Иванцыка. 2019 г.

**Fig. 7.** Moscow. The Musin-Pushkin Estate. Fragment of a white-stone cornice, found during architectural and archaeological research at the site of the fence located on Spartakovskaya Street. Photo by T.V. Ivantsyk. 2019

### *I период:*

Каменная ограда со стороны Елоховской (Спартакховской) улицы была выстроена, очевидно, в первое десятилетие XIX в. Иконографический материал позволяет предполагать, что основные параметры сооружения начала XIX в. сохраняло вплоть до начала XX столетия.

### *II период:*

1910-е гг. Кардинальные изменения произошли в структуре ограды в начале 1910-х гг. в период крупномасштабной реконструкции ансамбля в целом и строительства на его территории нового корпуса гимназии. В этот же период к западной стене северного флигеля пристроили небольшой одноэтажный объем, что повлекло за собой изменение плановой структуры ограждения и, возможно, корректировку его внешнего облика, а также перемещение входной группы. Такая ситуация сохранялась вплоть до конца 1950-х гг., после чего данную пристройку демонтировали и заменили новым сооружением.

### *III период:*

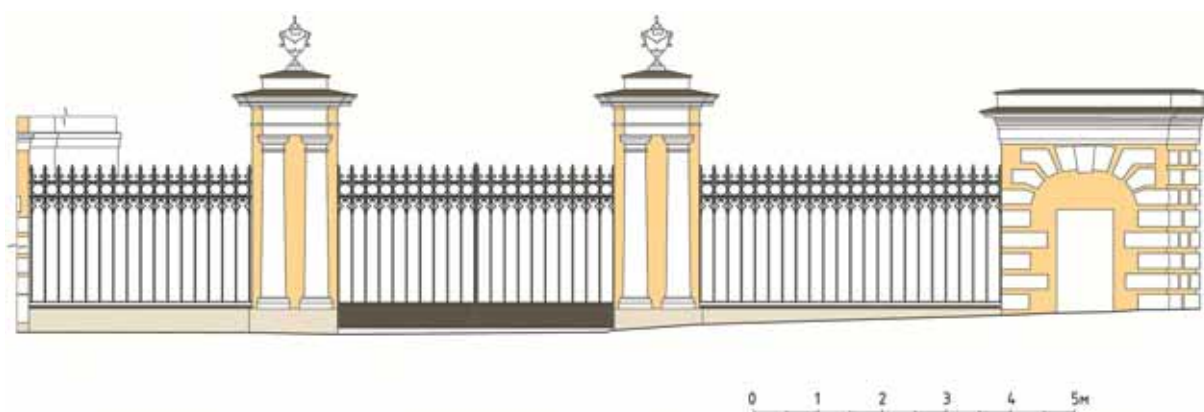
1987 год. Период ремонтно-реставрационных работ, в результате которых ограда была основательно реконструирована. Полностью, начиная от верхнего среза фундамента, были выполнены воротные столбы и западное кирпичное прясло. В этот же период заменили решетку ворот, а фланкирующие их более ранние декоративные металлические заполнения предпочли сохранить. Следовательно, дошедший до нашего времени памятник представляет собой объем, практически полностью воссозданный в советское время. Однако обнаруженные артефакты дают основание предполагать, что это воссоздание носило больше утилитарное значение и не стремилось к выявлению исторического облика. Подобная ситуация для данного ансамбля в целом не единична, так как фасадам расположенного по соседству Северного флигеля, несмотря на проектно-реставрационные решения 1960-х гг., так же не вернули первоначальный вид.

Таким образом, комплексно изучив памятник, в настоящее время мы имеем возможность предложить его воссоздание на начальный период (рис. 8). Основными материалами, позволившими предложить восстановление постройки начала XIX в., стали обнаруженные при исследовании детали утраченного первоначального объема. Это — белокаменная профилированная деталь классицистического карниза и фрагмент белокаменной полуколонны (рис. 6, 7). Эти находки с большой долей вероятности можно отнести именно к рассматриваемой постройке по причине того, что в иных сооружениях усадьбы, как в сохранившихся, так и утраченных, подобных элементов выявлено не было. Вероятно, отсутствовали они и в постройках XVIII в., стоявших в данной части домовладения до строительной деятельности А.И. Мусина-Пушкина, поскольку в тот период на-

ходившиеся здесь сооружения были, по всей видимости, деревянными. Косвенно в пользу того, что обнаженные фрагменты являются элементами утраченного ограждения, говорит и тот факт, что подобные колонны некогда присутствовали на столбах ныне утраченных западных ворот, расположенных со стороны Доброслободской улицы (рис. 9). А ведь эти ворота были, по всей видимости, менее значимы в контексте усадебного комплекса.

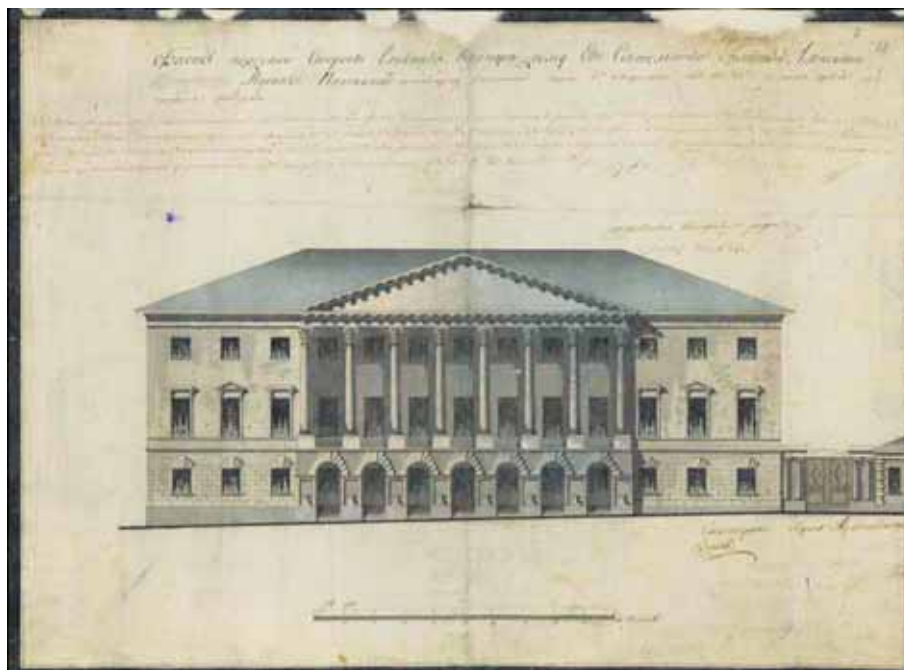
Что же касается обнаруженных белокаменных деталей, то «монтируя» эти элементы в составе кон-

струкций ограды, мы тем самым соотносим их с целым рядом хронологически, типологически и, главное, функционально близких построек Москвы из альбома М.Ф. Казакова, как сохранившихся, так и утраченных [1]. Это — ограды домов Плещеева и Куракина на Новой Басманной (рис. 10–12), Ермолова на Тверской (рис. 13), Губина на Петровке (рис. 14), Безсонова на Никитской (рис. 15), Салтыкова на Тверской (рис. 16), Голицына на Большой Дмитровке (рис. 17), Барышникова на Мясницкой (рис. 18), Демидова на Новой Басманной (рис. 19).



**Рис. 8.** Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Первоначальный облик ограды по Спартаковской (Елоховской) улице. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 8.** Moscow. The Musin-Pushkin Estate. The original appearance of the fence on Spartakovskaya (Yelokhovskaya) Street. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NRU MGSU



**Рис. 9.** Москва. Главный фасад дома усадьбы Мусиных-Пушкиных с воротами со стороны Доброслободской улицы. Середина 1830-х гг. Из материалов архитектурного обследования НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 9.** Moscow. The main facade of the house of the Musin-Pushkin Estate with the gate from Dobroslobodskaya Street. Mid-1830s. From the materials of the architectural survey carried out by the NRU MGSU

В аналогичных постройках Казакова можно найти такие же наделенные дорическим ордером колонны с читаемым энтазисом и характерной выкружкой, а также подобный обнаруженному классицистический карниз, который присутствует в справочнике И.А. Киселева [14]. Из числа названных построек особо следует указать на территориально близкие сооружения — воротные столбы дома Плещеева

на Новой Басманной (рис. 10, 11), которые вполне можно рассматривать в качестве базовых при реконструкции ограды усадьбы Мусиных-Пушкиных. Добавим, что существующие белокаменные карнизы столбов, выполненные в период ремонтно-реставрационных работ, несколько отличаются от тех, что были обнаружены при архитектурно-археологических исследованиях.

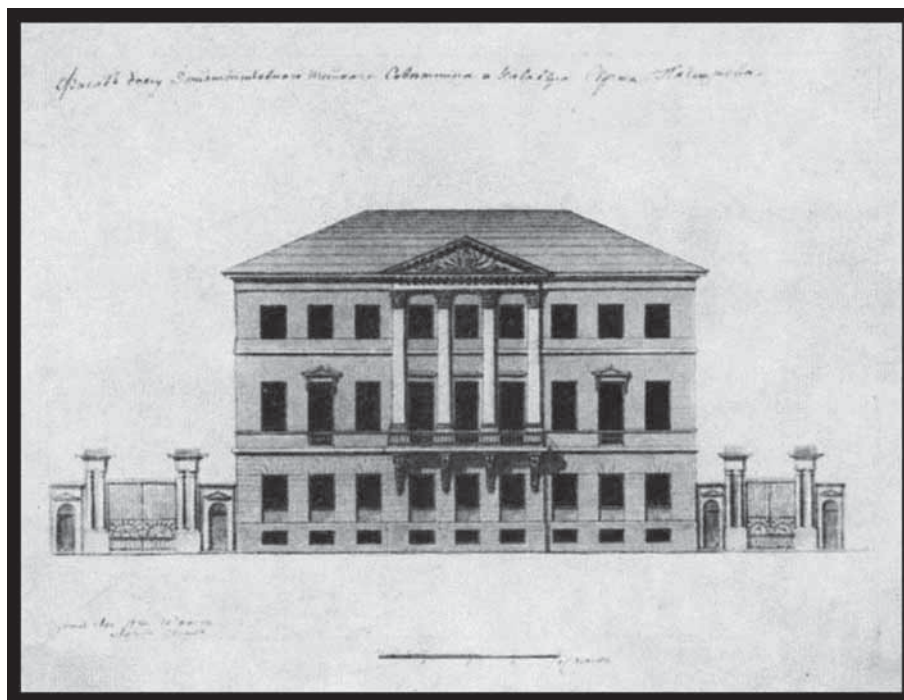


Рис. 10. Москва. Дом Плещеева на Новой Басманной. Построен после 1797 г. Современный адрес: ул. Новая Басманная, д. 12 [1, с. 231]

Fig. 10. Moscow. Pleshcheev's House on Novaya Basmannaya Street. Built after 1797. Current address: Novaya Basmannaya Street, 12 [1, p. 231]



Рис. 11. Москва. Дом Плещеева. Ул. Новая Басманная, д. 12. Общий вид ограды. Фото 2019 г.

Fig. 11. Moscow. Pleshcheev's House on Novaya Basmannaya Street, 12. General view of the fence. Photo, 2019

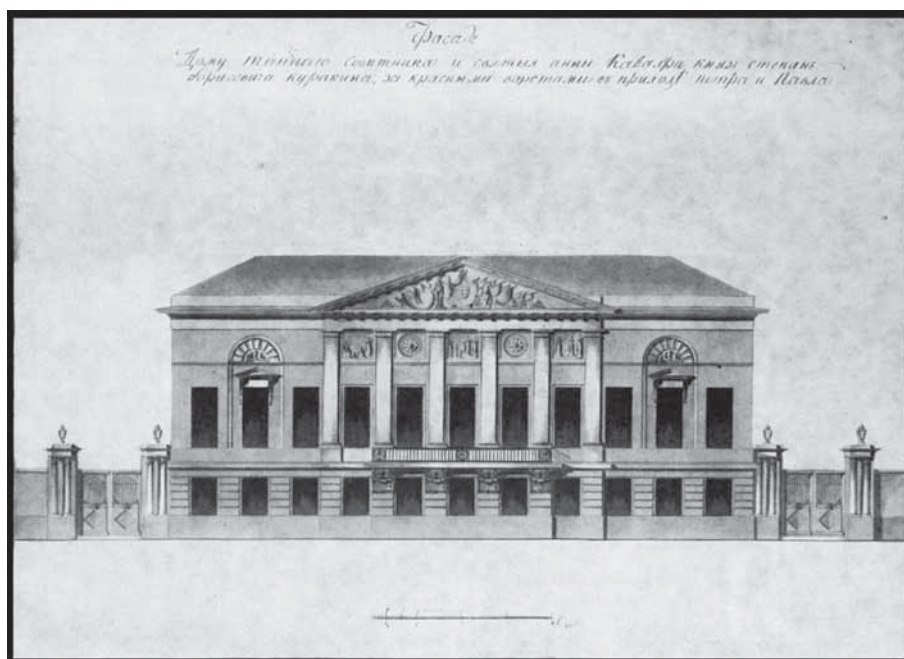


Рис. 12. Москва. Дом Куракина на Новой Басманной. 1780-е гг. [1, с. 236]

Fig. 12. Moscow. Kurakin House on Novaya Basmannaya Street. Built in the 1780s. [1, p. 236]

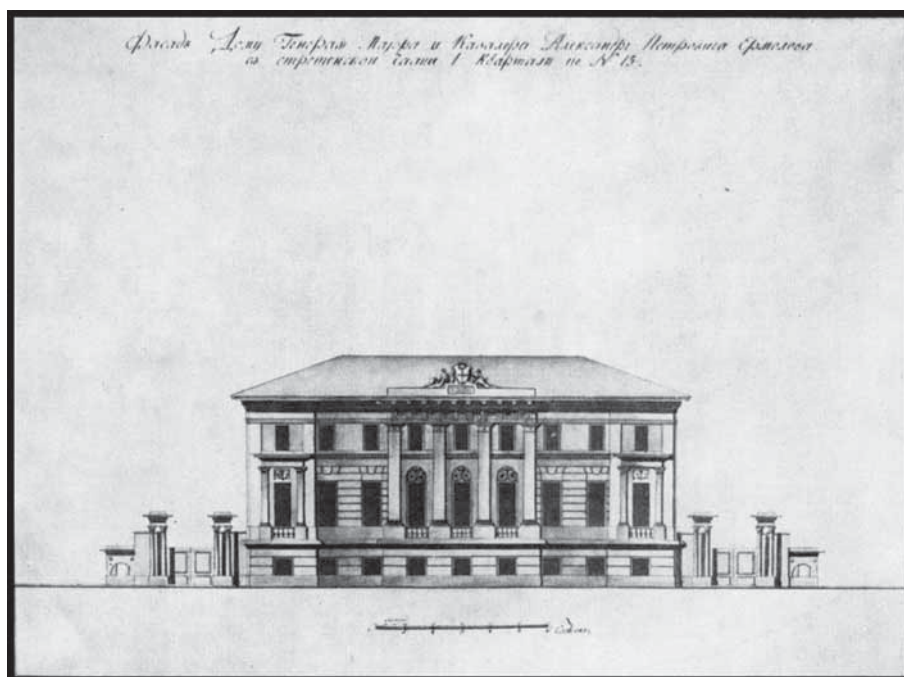
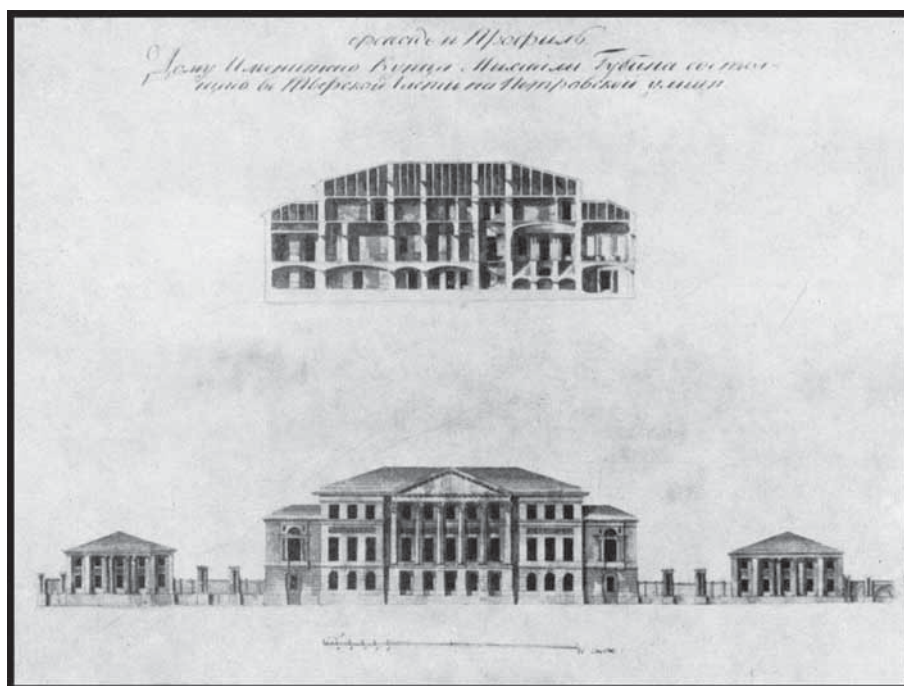


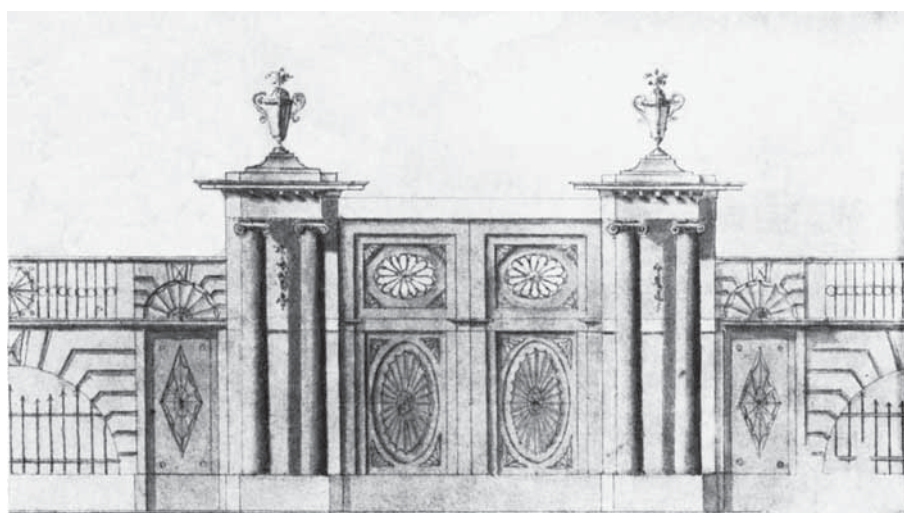
Рис. 13. Москва. Дом Ермолова на Тверской. Отстроен после 1773 г. с использованием стен более раннего здания [1, с. 38]

Fig. 13. Moscow. The Museum-Estate of M.N. Ermolova / The Theater Salon on Tverskoy Boulevard. Rebuilt after 1773 using the walls of the earlier building [1, p. 38]



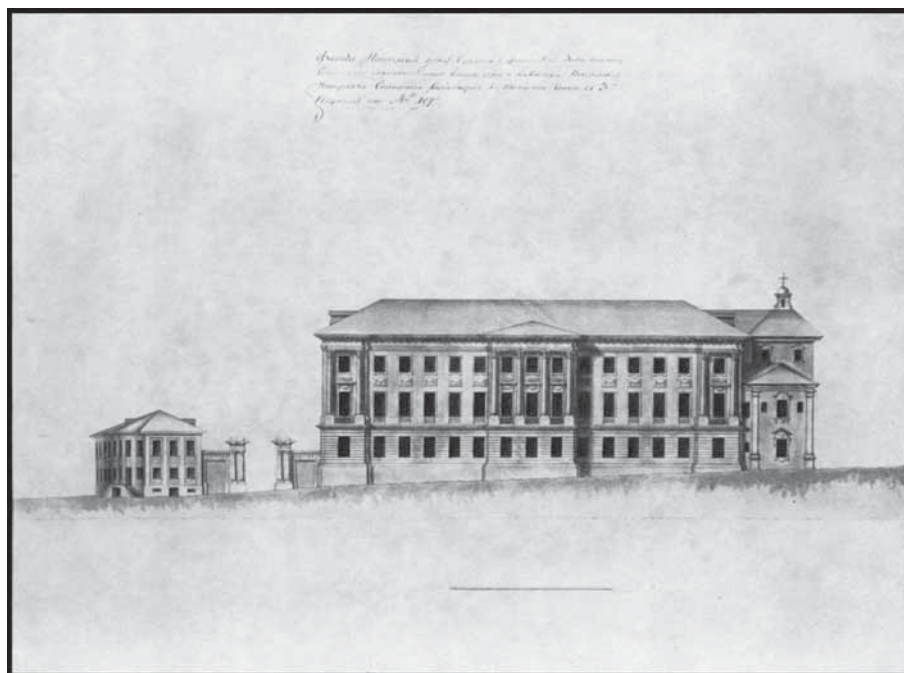
**Рис. 14.** Москва. Дом Губина на Петровке. Построен в 1790-е гг. М.Ф. Казаковым. В 1812 г. дом горел, восстановлен в 1828 г. [1, с. 61]

**Fig. 14.** Moscow. Gubin House on Petrovka Street. Built in the 1790s by M.F. Kazakov. In 1812 the house burned, restored in 1828 [1, p. 61]



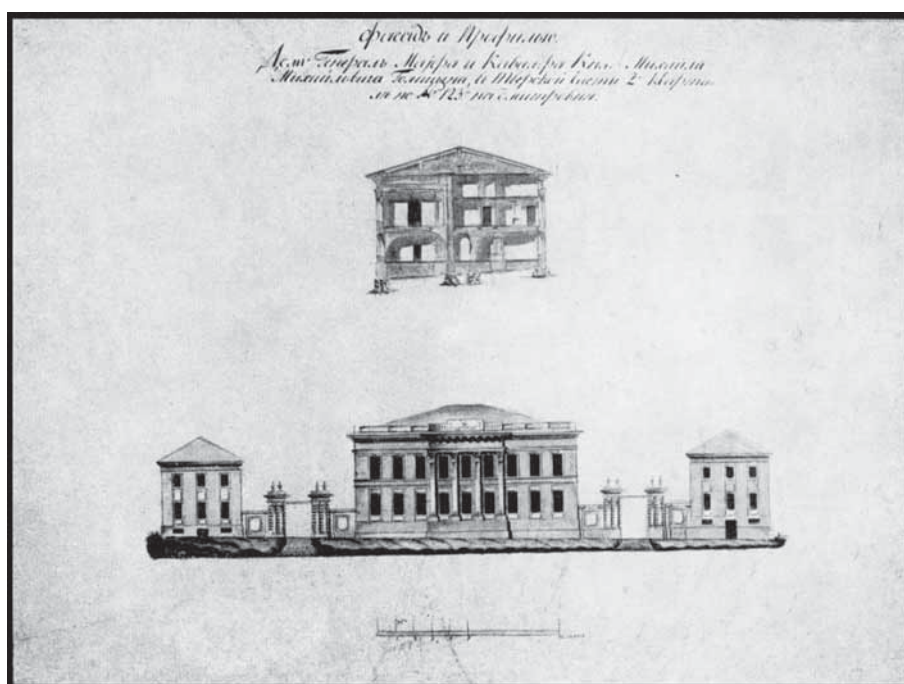
**Рис. 15.** Москва. Дом Безсонова на Никитской. На планах участка 1758, 1774 и 1802 гг. совпадающий по очертаниям и габаритам дом был расположен в глубине владения, тогда как на чертеже альбома он вынесен на линию улицы. Данное обстоятельство заставляет сделать предположение о том, что в альбом был помещен вариант проекта нового здания, оставшийся не осуществленным. Фрагмент ограды [1, с. 87]

**Fig. 15.** Moscow. Bessonov's House on Nikitskaya Street. On the site plans of 1758, 1774 and 1802, the house of the same shape and size was located in the back of the estate, while in the album drawing it was placed on the street line. This aspect leads to the assumption that an alternate design of a new building was placed in the album and remained unrealized. Fragment of the fence [1, p. 87]



**Рис. 16.** Москва. Дом Салтыкова на Тверской. Строительство главного дома относится к первой половине XVIII в. В 1773 г. был построен флигель с воротами [1, с. 152]

**Fig. 16.** Moscow. Saltykov's House on Tverskaya Street. The construction of the main house dates back to the first half of the 18th century. In 1773 an outbuilding with a gate was built [1, p. 152]



**Рис. 17.** Москва. Дом Голицына на Большой Дмитровке. Показан на плане квартала 1777 г. В 1812 г. горел, в 1820 г. отстроен вновь. Разобран в конце XIX в. [1, с. 150]

**Fig. 17.** Moscow. House of Golitsyn on Bolshaya Dmitrovka Street. Shown on the quarter plan of 1777. It burned in 1812, and in 1820 it was rebuilt. Demounted at the end of the 19th century [1, p. 150]



**Рис. 18.** Москва. Дом Барышникова на Мясницкой. Время постройки может быть отнесено к концу 1790-х гг., так как на плане улицы, датированном началом 1797 г., построенный М.Ф. Казаковым дом еще не отражен [1, с. 302]

**Fig. 18.** Moscow. Baryshnikov House on Myasnitskaya Street. The time of construction can be dated back to the end of the 1790s, since the house built by Kazakov has not yet been drawn in the street plan of the beginning of 1797 [1, p. 302]



**Рис. 19.** Москва. Ограда дома Демидова. 1790 г. Ул. Новая Басманная, д. 26. Фото 2019 г.

**Fig. 19.** Moscow. The fence of the Demidov's House. 1790. Novaya Basmannaya Street, 26. Photo, 2019

Характерной чертой аналогичных построек из альбома М.Ф. Казакова можно считать завершение столбов ограды вазонами, поэтому, используя модуль найденного фрагмента колонны и предполагаемые на основе аналогов габариты столба, можно опять же, ориентируясь на вышеупомянутый источник, включить вазоны в предлагаемую реконструкцию северного участка ограды рассматриваемого домовладения (рис. 20).

Что касается цветового решения для данного сооружения, то его целесообразно принять аналогичным северному флигелю и главному дому, которые, как показывают химико-технологические исследования, в начале XIX в. имели желтый колер по тонкой известковой обмазке.



**Рис. 20.** Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Участок ограды по Спартаковской (Елоховской) улице во взаимосвязи с северным флигелем. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 20.** Moscow. The Musin-Pushkin Estate. Section of the fence on Spartakovskaya (Elokhovskaya) Street in conjunction with the northern wing. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NRU MGSU

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казаков. М. : Госстройиздат, 1956. 327 с.
2. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1). 1802–1804 гг.
3. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2). 1824 г.
4. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1–2. ООО «Арсимум». М., 2011.
5. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии. 1835–1885. М. : тип. Е. Лисснер и Ю. Роман, 1885. С. 3–5.
6. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. ООО «Арсимум». М., 2011; Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. 1913 г. Л. 2.
7. ЦГА Москвы. Ф. 179. Оп. 47. Д. 535. Начало XX в.
8. Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. 1913 г. Л. 2.
9. Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. 1932 г. Л. 6.
10. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1719. 1958 г. Л. 6.
11. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. 1966 г. Л. 7.
12. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1725. 1987 г. Л. 8-9.
13. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1725. 1987 г. Л. 8-9.
14. Киселев И.А. Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII–XIX веков : справочник архитектора-реставратора. М. : Academia, 2005. С. 176.

Поступила в редакцию 27 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Тимур Викторович Иванцык** — архитектор-реставратор I категории, член Союза реставраторов России, главный архитектор проектов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; timurahc@yandex.ru;

**Алексей Маратович Салимов** — доктор искусствоведения, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России)**; 111024, г. Москва, ул. Душинская, д. 9; РИНЦ ID: 428091; sampochta@mail.ru.

## REFERENCES

1. Beletskaya E.A. *Architectural albums M.F. Kazakov*. Moscow, Gosstroyizdat, 1956; 327. (rus.).
2. *Central State Archive of Moscow*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 1). 1802-1804. (rus.).
3. *Moscow Central State Archive*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 2). 1824. (rus.).
4. *Archive of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds*. T. 1-2. Arsimum LLC. Moscow, 2011. (rus.).
5. Gulevich S. *Historical note on the 50th anniversary of the Moscow 2nd gymnasium. 1835-1885*. Moscow, printing house E. Lissner and J. Roman, 1885; 3-5. (rus.).
6. *Archive of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds*. T. 1. Arsimum LLC. Moscow, 2011; *Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2. Maintenance Service No. 2. File 636. 1913. Sheet 2*. (rus.).
7. *Moscow Central State Archive*. Fund 179. L. 47. File 535. Early 20th century. (rus.).
8. *Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2. Maintenance Service No. 2. File 636. 1913. Sheet 2*. (rus.).
9. *Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2. Maintenance Service No. 2. File 636. 1932. Sheet 6*. (rus.).
10. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1719. 1958. Sheet 6. (rus.).
11. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1721. 1966. Sheet 7. (rus.).
12. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1725. 1987. Sheets 8-9. (rus.).
13. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1725. 1987. Sheets 8-9. (rus.).
14. Kiselev I.A. *Architectural details in Russian architecture of the 18th – 19th centuries. Conservation Architect's Reference*. Moscow, Academia, 2005; 176. (rus.).

Received November 27, 2020.

Adopted in revised form on February 5, 2021.

Approved for publication on March 29, 2021.

BIONOTES: **Timur V. Ivantsyk** — architect-restorer of the 1st category, member of the Union of Restorers of Russia, chief architect of projects; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; timurahc@yandex.ru;

**Aleksey M. Salimov** — Doctor of Arts, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), Chief Researcher; **Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG)**; 9 Dushinskay st., Moscow, 111024, Russian Federation; ID RISC: 428091; sampochta@mail.ru.

## Оценка градостроительного развития социальной инфраструктуры на основе интегрального рейтинга районов (на примере 25 районов Москвы)

Ю.Г. Страшнова<sup>1</sup>, Л.Ф. Страшнова<sup>1</sup>, Т.И. Жукова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственное автономное учреждение города Москвы «Научно-исследовательский и проектный институт Генерального плана города Москвы» (ГАУ «Институт Генплана Москвы»); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ «Информатика и управление» РАН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Изложены методы и результаты социологического исследования, проведенного ГАУ «Институт Генплана Москвы» в 2019–2020 гг. с целью выявления удовлетворенности населения уровнем и качеством развития социальной инфраструктуры (объектов торговли, общественного питания, бытовых услуг, здравоохранения, социального обеспечения, образования, культуры и досуга, спорта). Актуальность исследования определена повышением значимости социального подхода к проектированию, что обусловлено формированием информационного общества, важностью анализа потребительского поведения населения с позиций изменения ценностных ориентаций, образа жизни, культурных установок в результате экономических преобразований, оказавших значительное влияние на поведение потребителей. Привлечение жителей к разработке перспектив развития районов проживания повышает качество градостроительной документации, поскольку формирует целевые показатели ее реализации с учетом запросов, основанных на удовлетворенности москвичей условиями проживания и комфортностью городской среды.

**Материалы и методы.** Применены методы натурного обследования (сбора информации о территории, населении, сложившейся застройке, состоянии объектов), системного, типологического, функционально-структурного анализа. Социологический опрос населения выполнялся методом онлайн-анкетирования, анализа и обобщения результатов, сравнения с данными официальной статистики.

**Результаты.** Исследование проведено в 25 районах Москвы (Северного, Северо-Западного и Зеленоградского административных округов). Проанализирована территориальная организация объектов социальной инфраструктуры, дана оценка качества среды обитания в пределах муниципальных образований, выявлен дефицит объектов. Определены перспективы развития социальной инфраструктуры с учетом мнения жителей районов.

**Выводы.** Создан уникальный инструмент для выявления складывающихся диспропорций в развитии социальной инфраструктуры, а также эффективного градостроительного планирования целостной городской среды, опирающийся как на нормативные расчеты, так и на оценку жителей. Для объективной оценки социального развития и разработки рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры разработаны: индекс обеспеченности жителей объектами социальной инфраструктуры, индекс многообразия объектов, интегральный индекс развития социальной инфраструктуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** градостроительное проектирование, социологическое исследование, расчетный и опросный индексы развития социальной инфраструктуры, интегральный рейтинг районов, качество городской среды

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Страшнова Ю.Г., Страшнова Л.Ф., Жукова Т.И. Оценка градостроительного развития социальной инфраструктуры на основе интегрального рейтинга районов (на примере 25 районов Москвы) // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 279–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.279-293

## Assessment of social facilities's urban development based on the integral rating of districts (case study of 25 districts of Moscow)

Yulia G. Strashnova<sup>1</sup>, Lyudmila F. Strashnova<sup>1</sup>, Tatyana I. Zhukova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Autonomous Institution Research and Design Institute of the General Plan of the City of Moscow (Genplan Institute of Moscow); Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article describes the methods and results of the sociological study carried out by the Institute of the Genplan Institute of Moscow in 2019–2020 to measure the satisfaction of the population with the level and quality of social infrastructure development (objects of commerce, public catering, household services, health care, social welfare, education, culture and leisure, sports). The relevance of research is reflected in the increasing importance of the social approach to design, due to the formation of the information society, the importance of analysing consumer behaviour of the population in terms of changes in value orientations and lifestyles, cultural attitudes as a result of economic transformations that have had

a significant impact on consumer behaviour. The involvement of residents in the development of prospects for the development of residential areas improves the quality of urban documentation, as it forms targets for its implementation; taking into account requests based on the satisfaction of Moscow's living conditions and the comfort of the urban environment.

**Materials and methods.** In carrying out the study, methods of field survey (collection of information on territory, population, built environment, state of the property) and systematic, typological, functional and structural analysis were applied. The sociological survey of the population was carried out by means of an online questionnaire, analysis and synthesis of the results and comparison with official statistics.

**Results.** The study was carried out in 25 districts of Moscow (Northern Administrative Okrug, North-Western Administrative Okrug and Zelenogradsky Administrative Okrug): the territorial organization of social infrastructure facilities was analysed, the quality of the living environment within municipalities was assessed. A lack of facilities has been identified. The prospects for the development of social infrastructure have been determined taking into account the views of the inhabitants of the districts.

**Conclusions.** The study provided a unique tool for identifying emerging imbalances in the development of social infrastructure, as well as effective urban planning of a cohesive urban environment, based on both normative calculations and population estimates. In order to objectively assess social development and to compile a ranking of districts according to the level of social infrastructure development, the following have been developed: index of population's social infrastructure, index of diversity of facilities, integral index of social infrastructure development.

**KEYWORDS:** urban planning, sociological research, integral district ranking, calculated and survey indices of social infrastructure development

**FOR CITATION:** Strashnova Yu.G., Strashnova L.F., Zhukova T.I. Assessment of social facilities's urban development based on the integral rating of districts (case study of 25 districts of Moscow). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):279-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.279-293 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества жизни населения является одним из основных приоритетов развития не только городских территорий в России, но и страны в целом. Качество жизни в городе при всем многообразии определяющих его факторов подразумевает прежде всего:

- качество жилой среды — наличие комфортного жилья, доступность и разнообразие объектов торговли, услуг, образования, здравоохранения, культуры и досуга;
- физическое благополучие — наличие условий для безопасного передвижения по городу, благоприятная экологическая обстановка, наличие рекреационной инфраструктуры для отдыха и досуга на открытом воздухе;
- самореализацию и саморазвитие — наличие пространств для удовлетворения индивидуальных интересов и потребностей горожан, например потребности в творчестве, образовании, реализации увлечений и хобби;
- социальное взаимодействие — наличие условий для комфортного общения между людьми, обмена информацией, взаимопомощи, совместного принятия решений в разных сферах городской жизни;
- развитую социальную инфраструктуру — ключевое условие в обеспечении вышеперечисленных процессов.

Цель исследования — определение удовлетворенности жителей уровнем развития социальной инфраструктуры. Достижение указанной цели предусматривало решение следующих задач: расчет опросного индекса обеспеченности и многообразия объектов социальной инфраструктуры (на основе мнения жителей); выявление дефицита видов объектов по возрастным группам населения; обоснование проблемных «точек» развития социальной ин-

фраструктуры (более 20 % неудовлетворенных жителей); выявление наиболее актуальных видов объектов; определение расчетного индекса обеспеченности, основанного на сопоставлении фактических значений показателей обеспеченности объектами социальной инфраструктуры районов с разработанными нормативными шкалами для каждого вида объектов, разработка методики оценки рейтинга районов по уровню развития объектов социальной инфраструктуры.

Объекты исследования — предприятия и организации семи отраслей социальной инфраструктуры (образования, здравоохранения, сферы социальной поддержки, культуры и досуга, торговли, общественного питания, бытовых услуг). Предмет исследования — поведенческие предпочтения населения в сфере услуг.

Изучение проводилось в границах районов г. Москва: Аэропорт, Беговой, Войковский, Головинский, Западное Дегунино, Коптево, Крюково, Кунцево, Куркино, Левобережный, Матушкино, Митино, Молжаниновский, Покровское-Стрешнево, Пресненский, Савелки, Северное Тушино, Силино, Сокол, Старое Крюково, Строгино, Ховрино, Хорошевский, Щукино, Южное Тушино. Выбор территории обоснован наличием в районах северо-западного сектора всех возможных градостроительных ситуаций, присущих Москве.

Проведенная работа направлена на реализацию приоритета высокого качества жизни москвичей на основе определения основных подходов к формированию новой жилой и многофункциональной застройки и развитию уже застроенных территорий Москвы в соответствии с потребностями жителей. Вовлечение жителей в процесс разработки перспектив развития районов проживания повышает качество и вероятность успеха градостроительных проектов, поскольку формирует целевые показатели их

реализации с учетом запросов, основанных на удовлетворенности москвичей условиями проживания и комфортностью городской среды. Исследование удовлетворенности жителей уровнем и качеством развития социальной инфраструктуры районов проживания, а также их видение перспектив развития территорий поможет расставить приоритеты при выработке рекомендаций по формированию целостной городской среды и повышению качества жизни москвичей. Это позволит также более креативно реагировать на актуальные проблемы города, генерируя широкий спектр идей для развития сообщества и территории на основании учета мнения жителей.

Данное исследование является поисковым, позволяющим выявить и зафиксировать основные гипотезы и ключевые моменты, которые требуют верификации в полномасштабном эмпирическом исследовании, проводимом по всем правилам классического социологического исследования. В процессе работы создан уникальный инструмент для выявления складывающихся диспропорций в развитии социальной инфраструктуры, а также эффективного градостроительного планирования целостной городской среды, опирающийся как на нормативные расчеты, так и на оценку жителей. Нестандартным подходом служит использование субъективных оценок жителей удовлетворенностью социальным развитием территории проживания и нормативной обеспеченности населения объектами социальной инфраструктуры для построения «опросного» и расчетного рейтингов уровня развития объектов социальной инфраструктуры. Отмечается высокая социальная значимость подхода. Практическая значимость состоит в планировании пространственной доступности объектов социальной инфраструктуры, определении функционального состава общественных комплексов, внедрении в практику соучаствующего проектирования.

Исследования городской среды, условий жизни населения в городах, взаимосвязи среды обитания и поведения людей выполняются зарубежными социологами с начала XX столетия. Так, в первой половине XX в. Р. Парком, Э. Берджессом (основателями Чикагской школы социологии города) изучались городская среда и поведение горожан, во второй половине столетия Г. Вельцем, К. Линчем рассматривались городские сообщества, восприятие города и его образа<sup>1</sup>.

Чикагские социологи использовали в своих трудах не только официальную статистику, но и осуществляли самостоятельный сбор данных (в том числе применялось интервью), если готовые статистические сводки отсутствовали. Во второй половине 1930-х годов применялись методы статистического анализа (факторный, корреляционный) при

участии Э.У. Берджесса и У. Огборна)<sup>2</sup>. Большой вклад в изучение влияния на жизнь человека особенностей пространства, имеющихся ресурсов, их распределения внесли российские социологи и архитекторы: А. Высоковский, Т.М. Дридзе, В.Л. Глазичев, Б. Хиллер<sup>3, 4, 5</sup> [1, 2].

В настоящем столетии (2000–2020 гг.) внимание российских и зарубежных исследователей направлено на анализ и оценку качества жизни в городах, механизмов успешного функционирования городов, трансформаций, связанных с процессами глобализации, информатизации и перехода к постиндустриальному обществу, экономике «знаний» [3–7]. Работы современных урбанистов, экономистов, социологов, экономико-географов посвящены формированию комфортной, безопасной, экологичной, экономически эффективной городской среды, удовлетворяющей потребностям современного жителя. «Настоящее время — время смены основной парадигмы традиционного города. Умные и глобальные, зеленые и биосферосовместимые города, города для пешеходов и ориентированные на пассажирские виды транспорта — эти разные современные направления объединяет единая цель — формирование комфортной, безопасной, экологически чистой и одновременно экономически эффективной городской среды, удовлетворяющей потребностям современного жителя» [8]. Исследуется новая экономическая модель в работах зарубежных социологов («экономика совместного использования» или *sharing economy*). Анализируется влияние совместного использования ресурсов, территорий, товаров, услуг на «городскую ткань»: формирование города, городское устройство, инфраструктуру. Ученые приходят к выводу, что «экономика совместного использования» радикально меняет транспорт, жилье, личные услуги и множество других секторов, а также образ жизни горожан [9–15]. Первоначально за рубежом, затем в Российской Федерации приобретают распространение идеи «соучаствующего проектирования» (партиципации) — включения жителей в процесс принятия решений, которые их непосредственно касаются [16–22]. Обсуждаются управленческие подходы в развитии города, новые технологии в управлении. Управленческий аспект данной проблематики связан с выявлением особенностей взаимодействия органов власти

<sup>2</sup> Чикагская социология: сб. переводов / РАН ИНИОН; отв. ред. Д.В. Ефременко. М., 2015. 430 с.

<sup>3</sup> Высоковский А.А. Семь сюжетов о городе // Город как самоорганизующаяся система. Обнинск, 1997.

<sup>4</sup> Дридзе Т.М. Урбанизм и городская политика в свете экантропоцентрической социологии // Урбанизация в формировании социокультурного пространства. М.: Наука, 1999. 273 с.

<sup>5</sup> Дридзе Т.М. Человек и городская среда в прогнозном социальном проектировании // Общественные науки и современность. 1994. № 1. С. 131–38.

<sup>1</sup> Линч К. Образ города М.: Стройиздат, 1982.

и населения городов. Рассматриваются вопросы оптимизации системы «управления социальным обслуживанием населения мегаполиса» [23–25]. Разрабатываются методы, техника и процедуры, аппарат социологического исследования, позволяющего осуществлять мониторинг удовлетворенности жителей качеством городской среды [26–32].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информационной базой нашего исследования являлись данные Федеральной службы государственной статистики по г. Москве (о численности и возрастной структуре населения муниципальных районов города по состоянию на 01.01.2020 г.), районных органов исполнительной власти и социологического опроса. Все используемые сведения соответствовали следующим критериям: доступны по всем районам Москвы; верифицируемы; ежегодно обновляемы; собраны одинаковым способом в каждом из исследуемых районов.

Методология исследования включала системный и типологический анализы; вторичный анализ проведенных исследований; функционально-структурный анализ. Работы выполнялись методами: анкетирования при помощи интернета (онлайн-опроса); интервьюирования; статистической обработки данных с помощью пакета прикладных компьютерных программ; количественного и качественного анализа и обобщения первичной и вторичной социологической и статистической информации, интерпретации и визуализации полученных эмпирических материалов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненное Институтом генерального плана Москвы в 2019–2020 гг. исследование посвящено проблемам развития социальной инфраструктуры с позиций дифференциации обеспеченности населения районов города различными видами объектов обслуживания на основе изучения мнения жителей и сопоставления его с фактическими и расчетными нормативными показателями. Проведенное изучение направлено на реализацию приоритета высокого качества жизни москвичей на основе создания механизма эффективного градостроительного планирования целостной городской среды, опирающегося как на нормативные расчеты, так и на оценку жителей. Работа выполнена с учетом существующих международной и российской практик оценки удовлетворенности жителей качеством городской среды.

Международными организациями, занимающимися проблемами городов (ОЭСР, ООН-Хабитат, Всемирный банк, ВОЗ), регулярно отслеживается результативность реализации принятых ими программ, результаты исследований ежегодно публикуются в докладах ООН-Хабитат «О человеческом развитии», за период 1990–2019 гг. подготовлено

30 докладов. Разрабатываются рейтинги городов по уровню развития, привлекательности, качеству городской среды, человеческого потенциала; оцениваются: доступность услуг, жилья, транспортных систем, возможность трудоустройства, безопасность территорий и объектов, комфортность, связность территорий<sup>6</sup>. Эффективно используется индекс развития города (CDI), являющийся прототипом различных индексов развития (разработан для нужд Второй конференции ООН по проблемам населенных пунктов Хабитат II, проводимой с целью классификации городов по уровню их развития). В содержании данного отчета индекс используется в качестве статистической базы для сравнительной презентации ряда ключевых показателей Всемирной базы данных, до настоящего времени CDI является наилучшим единым показателем, используемым в международных сравнениях. Суть этой методики состоит в составлении отдельных субиндексов, которые затем суммируются для получения сложного индекса с учетом разного рода «взвешивающих коэффициентов», выделяющих отдельные аспекты изучаемой проблемы, имеющих особое значение в рамках проводимого исследования<sup>7</sup>. Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР — Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)), изучающей качество городской среды, разрабатывается и ежегодно публикуется «индекс лучшей жизни» (Better Life Index, 2011), позволяющий сравнивать благосостояние в разных странах по 11 аспектам, выделенным как важнейшие показатели физических условий и качества жизни<sup>8</sup>. Economist Intelligence Unit (EIU) разработан «индекс живучести» (Liveability Index, 2012), с использованием которого оцениваются условия жизни в 140 городах мира: рейтинг относительной комфортности по 30 показателям распределяется по пяти категориям (стабильность, здравоохранение, культура и окружающая среда, образование, инфраструктура). Опрос дает общую оценку от 0 до 100, где 1 — недопустимо, а 100 — идеально<sup>9</sup>. Рейтинги городов по качеству жизни ежегодно разрабатываются международными исследовательскими центрами и аудиторско-консалтинговыми компаниями: PricewaterhouseCoopers («Cities of Opportunity 7» PwC США); Институтом городских стратегий «Global Power City Index» (GPCI); «The

<sup>6</sup> ПРООН. Отчеты о человеческом развитии (за 1990–2019 гг.). URL: [hdr.undp.org/en/content/dashboard-5-socioeconomic-sustainability-0](http://hdr.undp.org/en/content/dashboard-5-socioeconomic-sustainability-0)

<sup>7</sup> The City Development Index (CDI) / The State of the World's Cities. UNCHS (Habitat), London : Earthscan, 2001. Pp. 116–119.

<sup>8</sup> OECD. Better Life Index. URL: [oecdbetterlifeindex.org/ru/topics/life-satisfaction-ru/](http://oecdbetterlifeindex.org/ru/topics/life-satisfaction-ru/)

<sup>9</sup> Рейтинг и обзор живучести. Liveability Index (A Summary of the Liveability Ranking and Overview August 12). 2012. URL: [oecdbetterlifeindex.org/ru](http://oecdbetterlifeindex.org/ru)

Global City». В указанных исследованиях города мира оцениваются по показателям: транспорт и инфраструктура; здоровье, безопасность и защищенность; устойчивость и окружающая среда; демография и жизнеспособность<sup>10, 11</sup>. Так, PricewaterhouseCoopers (PwC) разработан рейтинг 14 мегаполисов мира (в том числе Москвы, Барселоны, Берлина, Гонконга, Лондона, Нью-Йорка, Парижа и других, 2018 г.) по критериям комфортности жизни и воздействию на окружающую среду. Результаты пространственного анализа используются для оценки пространственной структуры городов, системы расселения и оптимальности размещения объектов, в частности: для расчета показателей близости расположения мест проживания граждан от социальной и транспортной инфраструктуры, озелененных пространств, а также для расчета показателей обеспеченности населения культурно-досуговыми и рекреационными объектами<sup>12</sup>. Центром глобализации и стратегии бизнес-школы IESE ежегодно разрабатывается индекс (IESE — города в движении), охватывающий такие аспекты мегаполисов, как: человеческий капитал, социальная сплоченность, окружающая среда, мобильность и транспорт, территориальное планирование, международная деятельность и технологии<sup>13</sup>. Рейтинговые исследования проводятся для оценки уровня развития городов и определения степени их соответствия концепции «умных городов»<sup>14, 15</sup> [33]. В российской практике градостроения система индексов широко применяется при решении задач оперативного территориального управления. В частности, в рамках национального проекта «Жилье и городская среда» и Федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ разрабатывается индекс качества городской среды. Он формируется на основе оценки шести типов городских пространств в соответствии с шестью критериями качества городской среды. Эта оценка подразумевает выделение для каждого типа пространства по каждому из критериев одного ключевого индикатора.

В итоге складывается матрица оценки из 36 индикаторов. Внутри каждой размерно-климатической группы городов создается индивидуальная 10-балльная шкала, устанавливаются максимальные и минимальные значения индикаторов, соответствующие определенному баллу. Индекс города рассчитывается как сумма баллов по 36 индикаторам, оцениваемым по шкале от 0 до 10, таким образом, максимальное количество баллов может составлять 360. В зависимости от итогового балла определяется качество городской среды. Такой подход позволяет выделить характерные черты и проблемные зоны, помогающие понять, как наиболее эффективно работать с каждой конкретной территорией<sup>16</sup>. Примером крупного исследования качества городской среды является работа Московского института социально-культурных программ «Механика Москвы» (2014 г.). В результате этой работы определен уровень развития муниципальных округов и выделены группы районов, близких по типу городской среды (офисно-туристические территории; комфортная Москва; семейные территории; периферия; молодая Москва; соседские территории; присоединенные города; исключенные территории; районы потенциальных изменений). Разработана система социологических и статистических показателей, описывающих сферы: благоустройство; безопасность; культура; образование; здравоохранение; экология; транспорт. Для выделения типов городской среды и групп районов, схожих друг с другом по набору заданных переменных, использованы методы факторного и кластерного анализа. Результаты анализа позволили оценивать диспропорции городского развития и формулировать приоритеты для работы с разными территориями столицы<sup>17</sup>.

В рамках нашего исследования проведен социологический опрос жителей районов Москвы, разработана методика определения рейтинга районов по уровню развития объектов социальной инфраструктуры. В качестве основного инструмента создан интегральный рейтинг, позволивший на основе независимой оценки сопоставить районы города по уровню социального развития. Интегральный рейтинг определен на основе «расчетного» рейтинга по уровню существующего развития социальной инфраструктуры и «опросного» рейтинга по удовлетворенности населения развитием социальной инфраструктуры.

Опрос проводился по двум методикам: онлайн-анкетированием с помощью интернет-ресурса (google.forms с распространением ссылки на опрос в социальных сетях, среди территориальных сооб-

<sup>10</sup> Global Power City Index 2016. URL: [mori-m-foundation.or.jp/english/ius2/gpci2/2016.shtml](http://mori-m-foundation.or.jp/english/ius2/gpci2/2016.shtml)

<sup>11</sup> Cities of Opportunity. URL: [pwc.com/gx/en/psrc/pdf/cities\\_of\\_opportunity2011.pdf](http://pwc.com/gx/en/psrc/pdf/cities_of_opportunity2011.pdf)

<sup>12</sup> Пространство города для человека. Исследование уровня и динамики градостроительного развития крупнейших мегаполисов мира. URL: [PwC.ru-city-space-short.pdf](http://PwC.ru-city-space-short.pdf)

<sup>13</sup> IESE Cities in Motion Index (CIMI). URL: [blog.iese.edu/cities-challenges-and-management/2019/05/10/iese-cities-in-motion-index-2019](http://blog.iese.edu/cities-challenges-and-management/2019/05/10/iese-cities-in-motion-index-2019)

<sup>14</sup> Cities in Motion IESE Business School University of Navarra. URL: [citiesinmotion.iese.edu/indicecim/?lang=en](http://citiesinmotion.iese.edu/indicecim/?lang=en) (рейтинг IESE Business School University of Navarra)

<sup>15</sup> European smart Cities. Technische Universitat Wien. URL: [smart-cities.eu/?cid=2&ver=3](http://smart-cities.eu/?cid=2&ver=3)

<sup>16</sup> Сайт Минстроя России. URL: <http://www.most.gov.ru/>

<sup>17</sup> Механика Москвы. Исследование городской среды. Издание Московского института социально-культурных программ, 2014. URL: <http://miscp.ru/assets/docs/mechanics-of-moscow.pdf>

ществ по районам, с помощью ресурса Яндекс.Район) и очным интервьюированием жителей районов в общественных местах (центрах предоставления государственных услуг «Мои документы», территориальных центрах социального обслуживания, торгово-развлекательных центрах). Было опрошено порядка 4200 респондентов в возрасте от 18 лет и старше. Количество опрашиваемых определялось численностью населения районов: в районе с самой большой численностью населения (Строгино) необходимо было собрать не менее 200 анкет. Основное требование репрезентативности опроса соблюдалось постоянным контролем соответствия половозрастной структуры фактического населения районов и половозрастной структуры респондентов выборки. Корректировка необходимой структуры производилась добавлением объектов для опроса, поставляющих респондентов недостающих возрастных когорт. Результаты социологического опроса позволили выявить мнение жителей о развитии социальной инфраструктуры района: удовлетворенности отдельными отраслями, востребованности объектов, нехватке определенных видов объектов с точки зрения всего населения в целом и отдельных возрастных групп. Так, наиболее востребованными объектами оказались: физкультурно-оздоровительные комплексы с бассейнами; пункты сбора вторсырья; кинотеатры; рынки и ярмарки выходного дня; парки для прогулок (рис. 1).

Для всесторонней характеристики сложных массовых явлений и анализа роли факторов в изменении результативных показателей использована система индексов, которые являются наиболее распространенными статистическими показателями в случае, когда сложные объекты не поддаются описанию с помощью отдельного показателя и требуют учета совокупности нескольких показателей, соответствующих различным аспектам их развития и функционирования. Так, на основе полученных эмпирических данных были разработаны опросные индексы удовлетворенности жителей социальной инфраструктурой по 25 районам, включающие опросный индекс обеспеченности жителей объектами социальной инфраструктуры и опросный индекс многообразия объектов социальной инфраструктуры районов. Индекс обеспеченности жителей объектами социальной инфраструктуры являлся показателем качества и количества реального практического использования существующих ресурсов со стороны тех, для кого они предназначены. Разработка опросного индекса обеспеченности жителей объектами социальной инфраструктуры позволила определить, соответствует ли выбранная стратегия развития районов запросам горожан, достижению высокой комфортности проживания в городе. Индекс многообразия определялся подсчетом общего количества видов объектов, которых не хватает всем респондентам. Для обеспечения сопоставимости уровней между районами, общее количество делилось на число проголосовав-

ших респондентов. Таким образом, был определен уровень района по индексу многообразия в расчете на одного респондента, что обеспечило сравнимость районов по этому показателю. Опросные индексы, разработанные на основе учета мнения жителей, позволили сравнивать и оценивать районы Москвы по выбранным критериям, выявлять «проблемные» точки каждого района.

Шкала индекса многообразия в расчете на одного жителя дала возможность в процессе исследования ранжировать все районы, экспертным путем разделив его значения на группы: выделив «средний уровень», выше среднего, высокий, ниже среднего и низкий. Уровни районов по индексу многообразия отображали виды объектов, которые находятся в дефиците в рассматриваемом районе. Соответственно, чем больше подобных объектов, тем хуже ситуация в районе с разнообразием видов услуг и соответственно, тем ниже уровень социального развития района, т.е. взаимосвязь обратно пропорциональная.

Опросный индекс удовлетворенности жителей районов объектами социальной инфраструктуры рассчитан как сумма коэффициентов удовлетворенности по всем отраслям. Коэффициенты удовлетворенности жителей развитием каждой из отраслей, в свою очередь, рассчитывались как фактическая доля населения, ответившая на вопрос анкеты «Удовлетворены ли Вы уровнем развития (конкретная отрасль социальной инфраструктуры) в Вашем районе?» — «полностью удовлетворен». Индексы удовлетворенности жителей социальной инфраструктурой позволяют осуществлять мониторинг ситуации в районах города, установить рейтинг районов по обеспеченности населения объектами, выделять эталонные районы, строить типологию мест проживания, основываясь на приоритете высокого социального развития и комфортности территорий проживания москвичей.

Для оценки развития социальной инфраструктуры, помимо «опросных», использованы «расчетные» индексы. «Расчетный» индекс районов по уровню развития социальной инфраструктуры является средним арифметическим значением показателей обеспеченности и территориальной доступности объектов в муниципальном районе. «Расчетный индекс» социального развития районов вычисляется суммированием отраслевых индексов по каждому району. В табл. 1 представлен сводный расчетный индекс существующего развития социальной инфраструктуры 25 районов.

«Интегральный» индекс развития социальной инфраструктуры определяется как среднее арифметическое значение показателя «расчетного» индекса районов по уровню развития социальной инфраструктуры и показателя «опросного» индекса районов по уровню удовлетворенности населения развитием социальной инфраструктуры, рассчитанных по 100-балльной шкале. Самые высокие показатели интегрального индекса означают, что по рассматриваемым аспектам, относящимся как к фактической

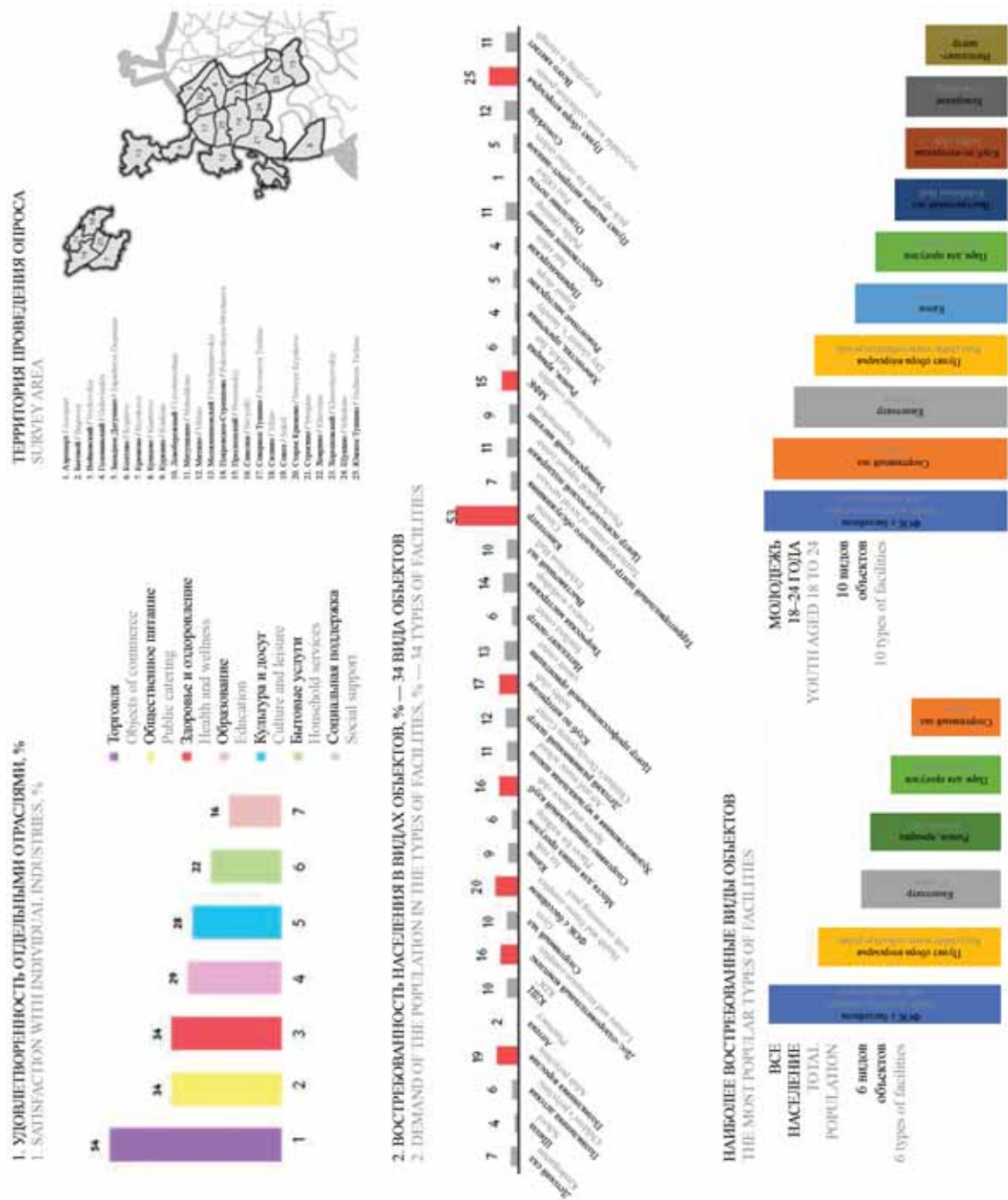


Рис. 1. Социологический опрос. Удовлетворенность жителей социальной инфраструктурой

Fig. 1. Sociological survey. Residents' satisfaction with social infrastructure

Табл. 1. Сводный «расчетный» индекс существующего развития социальной инфраструктуры

Table 1. Composite “calculated” index of the existing development of social infrastructure

| Район<br>District                              | Округ<br>Okrug | Суммарный индекс<br>обеспеченности (СЗ)<br>Total Infrastructure<br>Provision Index | Суммарный индекс<br>доступности (ВЗ)<br>Total availability index | Сводный «расчетный»<br>индекс<br>Composite “calculated”<br>index |
|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Аэропорт<br>Aeroport                           | CAO<br>NAO     | 74                                                                                 | 77                                                               | <b>75,5</b>                                                      |
| Беговой<br>Begovoy                             | CAO<br>NAO     | 82                                                                                 | 71                                                               | <b>76,5</b>                                                      |
| Войковский<br>Voykovskiy                       | CAO<br>NAO     | 74                                                                                 | 67                                                               | <b>70,5</b>                                                      |
| Головинский<br>Golovinskiy                     | CAO<br>NAO     | 74                                                                                 | 70                                                               | <b>72</b>                                                        |
| Западное Дегунино<br>Zapadnoye Degunino        | CAO<br>NAO     | 83                                                                                 | 76                                                               | <b>79,5</b>                                                      |
| Коптево<br>Koptevo                             | CAO<br>NAO     | 76                                                                                 | 78                                                               | <b>77</b>                                                        |
| Крюково<br>Kryukovo                            | ЗелАО<br>ZelAO | 71                                                                                 | 78                                                               | <b>74,5</b>                                                      |
| Кунцево<br>Kuntsevo                            | ЗАО<br>WAO     | 68                                                                                 | 70                                                               | <b>69</b>                                                        |
| Куркино<br>Kurkino                             | СЗАО<br>NWAO   | 62                                                                                 | 58                                                               | <b>60</b>                                                        |
| Левобережный<br>Levoberezhniy                  | CAO<br>NAO     | 74                                                                                 | 68                                                               | <b>71</b>                                                        |
| Матушкино<br>Matushkino                        | ЗелАО<br>ZelAO | 88                                                                                 | 80                                                               | <b>84</b>                                                        |
| Митино<br>Mitino                               | СЗАО<br>NWAO   | 78                                                                                 | 79                                                               | <b>78,5</b>                                                      |
| Молжаниновский<br>Molzhaninovskiy              | CAO<br>NAO     | 36                                                                                 | 39                                                               | <b>37,5</b>                                                      |
| Покровское-Стрешнево<br>Pokrovskoye-Streshnevo | СЗАО<br>NWAO   | 87                                                                                 | 61                                                               | <b>74</b>                                                        |
| Пресненский<br>Presnenskiy                     | ЦАО<br>CAO     | 86                                                                                 | 73                                                               | <b>79,5</b>                                                      |
| Савелки<br>Savyolki                            | ЗелАО<br>ZelAO | 82                                                                                 | 73                                                               | <b>77,5</b>                                                      |
| Северное Тушино<br>Severnoye Tushino           | СЗАО<br>NWAO   | 69                                                                                 | 75                                                               | <b>72</b>                                                        |
| Силино<br>Silino                               | ЗелАО<br>ZelAO | 64                                                                                 | 71                                                               | <b>67,5</b>                                                      |
| Сокол<br>Sokol                                 | CAO<br>NAO     | 81                                                                                 | 81                                                               | <b>81</b>                                                        |
| Старое Крюково<br>Staroye Kryukovo             | ЗелАО<br>ZelAO | 78                                                                                 | 86                                                               | <b>82</b>                                                        |
| Строгино<br>Strogino                           | СЗАО<br>NWAO   | 83                                                                                 | 84                                                               | <b>83,5</b>                                                      |
| Ховрино<br>Khovrino                            | CAO<br>NAO     | 76                                                                                 | 73                                                               | <b>74,5</b>                                                      |
| Хорошевский<br>Khoroshyovskiy                  | CAO<br>NAO     | 79                                                                                 | 62                                                               | <b>70,5</b>                                                      |
| Щукино<br>Schukino                             | СЗАО<br>NWAO   | 82                                                                                 | 73                                                               | <b>77,5</b>                                                      |
| Южное Тушино<br>Yuzhnoye Tushino               | СЗАО<br>NWAO   | 79                                                                                 | 72                                                               | <b>75,5</b>                                                      |

обеспеченности населения 25 районов г. Москвы объектами социальной инфраструктуры, так и к уровням, определенным на основе социологического опроса москвичей, районы с большим абсолютным значением показателя находятся на более высоком уровне развития, и далее по убыванию (рис. 2).

На основании интегрального индекса развития социальной инфраструктуры определен рейтинг муниципальных районов: чем выше индекс, тем выше место в рейтинге (табл. 2).

На рис. 2 представлен интегральный рейтинг районов по уровню развития социальной инфраструктуры (в баллах). Как видно из рис. 2, максимальному значению интегрального индекса соответствует первый (наивысший) рейтинг района по уровню социального развития. Районы, имеющие самый высокий рейтинг развития социальной инфраструктуры, расположены в Зеленоградском административном округе г. Москвы (Савелки, Матушкино и Старое Крюково), Хорошевский — на юго-западе Северного административного округа, Куркино — в Северо-Западном административном округе Москвы, Пресненский — в Центральном административном округе.

Методика включает все позиции, связанные с рейтингами и интегральным индексом, и апробирована на 25 районах. В результате сравнения расчетной и опросной обеспеченности населения района Пресненский объектами социальной инфраструктуры выявлены три ситуации соответствия индексов:

I. Опросная обеспеченность подтверждает расчетную, население считает существующее количество объектов достаточным, и расчетная обеспеченность — более 100 %. Данное положение считается наиболее благоприятным и не требует дополнительных мероприятий по усовершенствованию сети.

II. Опросная обеспеченность не соответствует расчетной, население считает существующее количество объектов достаточным, но по расчету необходимо дополнительное размещение данных объектов с целью разуплотнения существующих. Возможен обратный вариант: расчет показывает благоприятную ситуацию, а жители сообщают о нехватке. Ситуация требует рассмотрения причин расхождения результатов и путей решения проблем.

III. Опросная обеспеченность подтверждает расчетную, населением отмечен дефицит объектов, и расчетная обеспеченность — низкая. Это состояние считается объективно негативным и требует дополнительных мероприятий по усовершенствованию сети.

На примере района Пресненский по итогам сравнения расчетного и опросного индексов районов по уровню развития социальной инфраструктуры выявлены как положительные показатели по объектам социальной инфраструктуры (торговля, общественное питание, поликлиники для взрослых), так и дефицит необходимых для комфортного проживания населения объектов (физическая культура

и спорт, дополнительное образование). Кроме того, развития требуют объекты дошкольного и школьного образования, культуры и искусства, поликлиники для детей (рис. 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

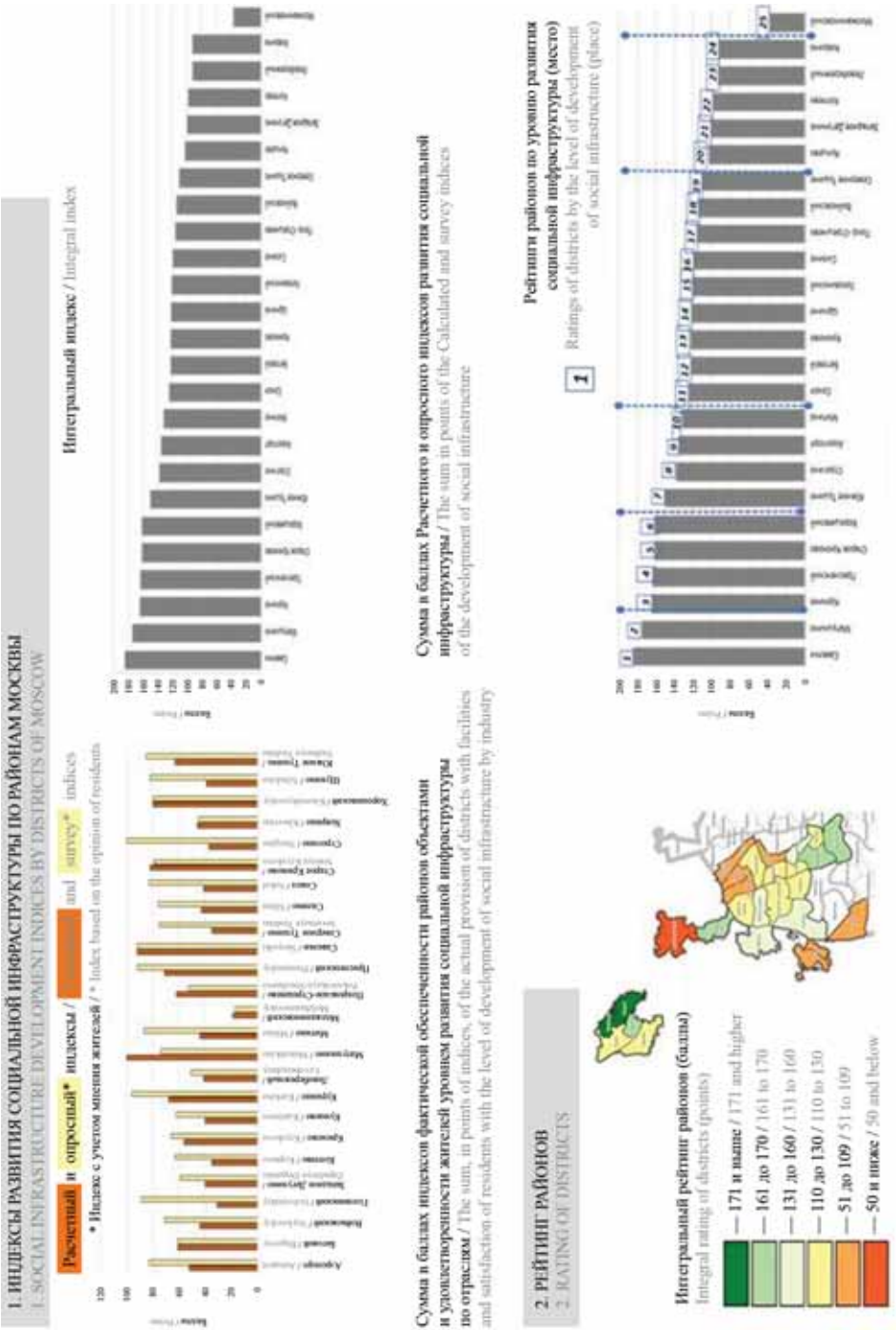
Социологические опросы являются широко применимым методом выявления общественного мнения по многим вопросам градостроительной политики и давно зарекомендовали себя оптимальным способом получения обратной связи от жителей по поводу имплементации политики повышения комфортности среды обитания для населения Москвы. Подобный метод, наряду с высокой эффективностью, оказывается весьма экономичным, поскольку дает возможность по сравнительно небольшим совокупностям опрошенных судить о состоянии и тенденциях развития процессов в местных сообществах.

Предложенная в данной работе методика расчета индекса развития социальной инфраструктуры районов г. Москвы и на его основе разработка рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры обладают существенными преимуществами перед известными работами в этой области. Впервые удалось осуществить в одном показателе одновременный учет качественных и количественных аспектов анализа, дополнив статистический мониторинг уровня развития социальной инфраструктуры районов элементами партисипативного подхода, включив в исследование результаты опроса общественного мнения — оценку жителями районов реального состояния сферы услуг на территории.

Предложенная методика разработки рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры основана на расчете интегрального индекса развития социальной инфраструктуры, который призван оценить фактический уровень развития районов по всему комплексу необходимых требований в формате, допускающем сопоставление. Рассчитанный интегральный индекс служит объективной основой для разработки рейтинга районов и их ранжирования по обеспеченности населения объектами сферы услуг.

Таким образом, исследование имеет важное значение для мониторинга реализации градостроительных программ в части достижения целевых показателей развития социальной инфраструктуры районов. Полученные результаты используются также в качестве индикаторов для определения индексов районов по удовлетворенности жителей социальным развитием территории проживания, которые составляются с учетом удовлетворенности жителей отдельными отраслями социальной инфраструктуры и при формировании рейтинга социального развития районов.

Направления будущих работ связаны с применением социологических опросов населения в составе разработки документации градостроительного проектирования и мониторинга ее реализации.



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

Рис. 2. Определение рейтинга районов по уровню развития социальной инфраструктуры  
Fig. 2. Determination of the rating of districts by the level of development of social infrastructure

Табл. 2. Интегральный рейтинг районов по уровню развития социальной инфраструктуры

Table 2. Integral rating of districts by the level of social infrastructure development

| Район<br>District                              | Округ<br>Okrug | Интегральный индекс<br>Integral index | Рейтинг районов по уровню развития<br>социальной инфраструктуры<br>Rating of districts by the level of development<br>of social infrastructure |
|------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Пресненский<br>Presnenskiy                     | ЦАО<br>CAO     | 97,32                                 | 1                                                                                                                                              |
| Строгино<br>Strogino                           | СЗАО<br>NWAO   | 96,48                                 | 2                                                                                                                                              |
| Матушкино<br>Matushkino                        | ЗелАО<br>ZelAO | 94,35                                 | 3                                                                                                                                              |
| Сокол<br>Sokol                                 | САО<br>NAO     | 93,78                                 | 4                                                                                                                                              |
| Савелки<br>Savyolki                            | ЗелАО<br>ZelAO | 93,31                                 | 5                                                                                                                                              |
| Старое Крюково<br>Staroye Kryukovo             | ЗелАО<br>ZelAO | 92,36                                 | 6                                                                                                                                              |
| Митино<br>Mitino                               | СЗАО<br>NWAO   | 92,29                                 | 7                                                                                                                                              |
| Аэропорт<br>Aeropot                            | САО<br>NAO     | 90,91                                 | 8                                                                                                                                              |
| Южное Тушино<br>Yuzhnoye Tushino               | СЗАО<br>NWAO   | 90,50                                 | 9                                                                                                                                              |
| Щукино<br>Schukino                             | СЗАО<br>NWAO   | 90,08                                 | 10                                                                                                                                             |
| Головинский<br>Golovinskiy                     | САО<br>NAO     | 88,82                                 | 11                                                                                                                                             |
| Беговой<br>Begovoy                             | САО<br>NAO     | 87,87                                 | 12                                                                                                                                             |
| Западное Дегунино<br>Zapadnoye Degunino        | САО<br>NAO     | 87,64                                 | 13                                                                                                                                             |
| Коптево<br>Koptevo                             | САО<br>NAO     | 87,37                                 | 14                                                                                                                                             |
| Северное Тушино<br>Severnoye Tushino           | СЗАО<br>NWAO   | 86,81                                 | 15                                                                                                                                             |
| Хорошевский<br>Khoroshyovskiy                  | САО<br>NAO     | 86,32                                 | 16                                                                                                                                             |
| Крюково<br>Kryukovo                            | ЗелАО<br>ZelAO | 86,28                                 | 17                                                                                                                                             |
| Войковский<br>Voykovskiy                       | САО<br>NAO     | 85,92                                 | 18                                                                                                                                             |
| Куркино<br>Kurkino                             | СЗАО<br>NWAO   | 84,50                                 | 19                                                                                                                                             |
| Ховрино<br>Khovrino                            | САО<br>NAO     | 83,46                                 | 20                                                                                                                                             |
| Силино<br>Silino                               | ЗелАО<br>ZelAO | 83,32                                 | 21                                                                                                                                             |
| Левобережный<br>Levoberezhniy                  | САО<br>NAO     | 82,18                                 | 22                                                                                                                                             |
| Покровское-Стрешнево<br>Pokrovskoye-Streshnevo | СЗАО<br>NWAO   | 80,74                                 | 23                                                                                                                                             |
| Кунцево<br>Kuntsevo                            | ЗАО<br>NAO     | 80,18                                 | 24                                                                                                                                             |
| Молжаниновский<br>Molzhaninovskiy              | САО<br>NAO     | 49,74                                 | 25                                                                                                                                             |

| РЕЗУЛЬТАТ СРАВНЕНИЯ ИНДЕКСОВ<br>INDEX COMPARISON RESULT                                                                                                                                                                                                        | ВИДЫ ОБЪЕКТОВ<br>TYPES OF FACILITIES                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. ОЦЕНКА СОВПАЛА<br/>РАСЧЕТНЫЙ = ОПРОСНЫЙ</p> <p>1. ASSESSMENT MATCHED<br/>CALCULATED = SURVEY</p> <p>• УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА<br/>• SATISFACTORY ASSESSMENT</p>                                                                                        | <p>• ТОРГОВЛЯ<br/>• БЫТОВОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ<br/>• ПОЛИКЛИНИКИ ДЛЯ ВЗРОСЛЫХ<br/>• OBJECTS OF COMMERCE<br/>• HOUSEHOLD SERVICES<br/>• POLYCLINICS FOR ADULTS</p>                     |
| <p>2. РАСХОЖДЕНИЕ ОЦЕНКИ<br/>РАСЧЕТНЫЙ <math>\leq</math> ОПРОСНЫЙ</p> <p>2. DIVERGENCE OF ASSESSMENT<br/>CALCULATED <math>\leq</math> SURVEY</p> <p>• КОНФИКТНЫЕ СИТУАЦИИ<br/>• ТРЕБУЕТСЯ РАЗВИТИЕ<br/>• CONFLICT SITUATIONS<br/>• DEVELOPMENT IS REQUIRED</p> | <p>• ДЕТСКИЕ САДЫ<br/>• ШКОЛЫ<br/>• КУЛЬТУРА И ИСКУССТВО<br/>• ПОЛИКЛИНИКИ ДЛЯ ДЕТЕЙ<br/>• KINDERGARTENS<br/>• SCHOOLS<br/>• CULTURE AND ART<br/>• POLYCLINICS FOR CHILDREN</p> |
| <p>ОЦЕНКА СОВПАЛА<br/>РАСЧЕТНЫЙ = ОПРОСНЫЙ</p> <p>• КОНФИКТНЫЕ СИТУАЦИИ<br/>• НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА — ТРЕБУЕТСЯ РАЗВИТИЕ<br/>• ASSESSMENT COINCIDED<br/>CALCULATED = SURVEY<br/>UNSATISFACTORY ASSESSMENT<br/>• DEVELOPMENT IS REQUIRED</p>              | <p>• ФИЗИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА И СПОРТ<br/>• ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ<br/>• PHYSICAL TRAINING AND SPORTS<br/>• ADDITIONAL EDUCATION</p>                                             |

Рис. 3. Итоги сравнения расчетного и опросного индексов районов по уровню развития социальной инфраструктуры (на примере Пресненского района)

Fig. 3. The results of comparing the calculated and survey indices of districts by the level of development of social infrastructure (for example, Presnenskiy district)

Результаты исследований могут использоваться управлениями градостроительного развития Москвы для выявления проблем территории при разработке проектно-планировочной документации, управы районов для контроля социальной напряженности, депар-

таментом градостроительной политики г. Москва, прочими отраслевыми департаментами, решающими вопросы социального развития города для определения приоритетных объектов при формировании ежегодных адресных инвестиционных программ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глазычев В.Л. Город без границ: монография. М.: Территория будущего, 2011. 397 с.
2. Шулепова Э.А. Культурная среда исторического города: методология изучения и трансляция // Культурологический журнал. 2011. № 2 (4). С. 3.
3. Голоухова Д.В. Методология исследования социально-территориальной структуры российского города: на примере Москвы: дис. ... канд. социол. наук. М., 2017. 25 с.
4. Яницкий О.Н. История городской социологии в России: эволюция идей // Социологические исследования. 2016. № 8 (388). С. 117–126.
5. Птичникова Г.А. Пространство современного города как выражение социальных процессов (о «справедливости и несправедливости» городских пространств) // Социология города. 2020. № 2. С. 5–16.
6. Сергеева О.Е., Лазарева Е.Н. Комфортная городская среда как определяющий фактор развития

мегаполисов // Управленческое консультирование. 2018. № 11 (119). С. 166–173. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-11-166-173

7. *Sassen S.* The global city: Enabling economic intermediation and bearing its costs // *City & Community*. 2016. Vol. 15. Issue 2. Pp. 97–108. DOI: 10.1111/cico.12175

8. *Кочуров Б.И., Ивашкина И.В., Фомина Н.В., Ермакова Ю.И., Ермиенко А.В.* Конвергентные факторы экологически безопасного и ноосферного развития мегаполисов (на примере г. Москвы) // Устойчивое развитие территорий: сборник докладов II Международной научно-практической конференции. 2019. С. 40–46.

9. *Davidson N.M., Infranca J.* The sharing economy as an urban phenomenon // *Yale Law & Policy Review*. 2016. Vol. 34. Issue 2.

10. *Schor J.* Debating the sharing economy // *Journal of Self-Governance and Management Economics*. 2016. Vol. 4. Issue 3. P. 7. DOI: 10.22381/JSME4320161

11. *McLaren D., Agyeman J.* Sharing cities: A case for truly smart and sustainable cities. Cambridge, MA, USA : The MIT Press, 2016. 445 p. DOI: 10.7551/mitpress/9780262029728.001.0001

12. *Akhavan M., Mariotti I., Astolfi L., Canevari A.* Coworking spaces and new social relations: A focus on the social streets in Italy // *Urban Science*. 2018. Vol. 3. Issue 1. P. 2. DOI: 10.3390/urbansci3010002

13. *Durante G., Turvani M.* Coworking, the sharing economy, and the city: Which role for the 'Coworking Entrepreneur'? // *Urban Science*. 2018. Vol. 2. Issue 3. P. 83. DOI: 10.3390/urbansci2030083

14. *Fathullah A., Willis K.* Engaging the senses: The potential of emotional data for participation in urban planning // *Urban Science*. 2018. Vol. 2. Issue 4. P. 98. DOI: 10.3390/urbansci2040098

15. *Salvia G., Morello E., Arcidiacono A.* Sharing cities shaping cities. MDPI — Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. P. 142. DOI: 10.3390/books978-3-03897-989-0

16. *Санюфф Г.* Соучаствующее проектирование: практики общественного участия в формировании среды больших и малых городов / пер. с англ. Вологда : Проектная группа 8, 2015. 169 с.

17. *Steiniger S., Poorazizi M.E., Hunter A.J.S.* Planning with citizens: Implementation of an e-planning platform and analysis of research needs // *Urban Planning*. 2016. Vol. 1. Issue 2. Pp. 49–64. DOI: 10.17645/up.v1i2.607

18. *Münster S., Georgi C., Heijne K., Klamert K., Noennig J.R., Pump M. et al.* How to involve inhabitants in urban design planning by using digital tools? An overview on a state of the art, key challenges and promising approaches // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 112. Pp. 2391–2405. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.102

19. *Farinosi M., Fortunati L., O'Sullivan J., Pagani L.* Enhancing classical methodological tools to foster participatory dimensions in local urban planning // *Cities*. 2019. Vol. 88. Pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.cities.2018.11.003

20. *Агеева А.Н.* Партиципативные социальные технологии принятия муниципальных управленческих решений в зарубежных странах // *Juvenis Scientia*. 2017. № 8. С. 38–41.

21. *Реутов Е.В.* Городское пространство и социальное доверие // *Социология города*. 2018. № 2. С. 55–64.

22. *Бышова А.Б.* Развитие идей партиципативного проектирования и применение их на практике // *Архитектурные исследования*. 2018. № 4 (16). С. 12–20.

23. *Расходчиков А.Н.* Информационно-коммуникационное взаимодействие власти и общества: в поиске эффективных технологий // *Мониторинг общественного мнения: Экономические и социальные перемены*. 2017. № 2. С. 263–273. DOI: 10.14515/monitoring.2017.2.14

24. *Климова С.Г., Климов И.А.* Взаимодействие горожан с властью: компетентное участие и проблема посредников // *Социологические исследования*. 2015. № 4 (372). С. 51–57.

25. *Масланов Д.В.* Новые информационно-коммуникационные технологии для муниципального управления: краудсорсинг как инструмент улучшения взаимодействия «города» и горожан // *Урбанистика*. 2015. № 4. С. 1–13. DOI: 10.7256/2310-8673.2015.4.17246

26. *Сафарова М.Д.* Практика применения института публичных слушаний в градорегулировании // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2015. № 9 (168). С. 21–35.

27. *Комарова Н.Ю.* Социологический мониторинг в оптимизации системы управления социальным обслуживанием населения мегаполиса на примере г. Москвы : автореф. дис. ... канд. социол. наук. М., 2016. 27 с.

28. *Столбов В.П., Староста П.Ю.* Социология городской среды : монография. М. : ИНФРА-М, 2017. 173 с.

29. *Resch B., Summa A., Zeile P., Strube M.* Citizen-centric urban planning through extracting emotion information from twitter in an interdisciplinary space-time-linguistics algorithm // *Urban Planning*. 2016. Vol. 1. Issue 2. Pp. 114–127. DOI: 10.17645/up.v1i2.617

30. *Resch B., Summa A., Sagl G., Zeile P., Exner J.-P.* Urban emotions — geo-semantic emotion extraction from technical sensors, human sensors and crowdsourced data // *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer International Publishing, Cham, 2015. Pp. 199–212. DOI: 10.1007/978-3-319-11879-6\_14

31. *Касьянов В.Ф., Ромашева М.Н.* Благоустройство внутренних пространств жилой застройки г. Москвы. Результаты социологического исследова-

дования // Недвижимость: экономика, управление. 2018. № 4. С. 63–68.

32. Старикова М.М. Качество городской среды с позиции жилищной инфраструктуры микрорайонов (на примере г. Кирова) // Социология города. 2018. № 3. С. 41–62.

Поступила в редакцию 7 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 29 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 5 апреля 2021 г.

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

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

**Татьяна Ивановна Жукова** — кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник; **Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ «Информатика и управление» РАН);** 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44/2; gukovati@mail.ru.

## REFERENCES

1. Glazychev V.L. *A city without borders: monograph*. Moscow, Territory of the Future, 2011; 397. (rus.).
2. Shouleпова E.A. Cultural milieu in historical town: research methodologies and translation. *Cultural Journal*. 2011; 2(4):3. (rus.).
3. Goloukhova D.V. *Research methodology for the socio-territorial structure of a Russian city: on the example of Moscow : dis. ... cand. of sociological sciences*. Moscow, 2017; 25. (rus.).
4. Yanitzky G.N. A history of urban sociology in XX century Russia. *Sociological Research*. 2016; 8:117-126. (rus.).
5. Ptichnikova G.A. Urban space as an expression of social processes (“justice and injustice” in the city). *Sociology of City*. 2020; 2:5-16 (rus.).
6. Sergeeva O.E., Lazareva E.N. Comfortable urban environment as the determining factor of the development of megapolises. *Administrative Consulting*. 2018; 11:166-173. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-11-166-173 (rus.).
7. Sassen S. The Global City: Enabling Economic Intermediation and Bearing Its Costs. *City & Community*. 2016; 15(2):97-108. DOI: 10.1111/cico.12175
8. Kochurov B.I., Ivashkina I.V., Fomina N.V., Ermakova Y.I., Ermienko A.V. Convergent factors of ecologically safe and noospheric development of megapolises (on the example of Moscow). *Sustainable Development of Territories: Collection of Reports of the II International Scientific and Practical Conference*. 2019; 40-46. (rus.).
9. Davidson N.M., Infranca J. The Sharing Economy as an Urban Phenomenon. *Yale Law & Policy Review*. 2016; 34(2).
10. Schor J. Debating the sharing economy. *Journal of Self-Governance and Management Economics*. 2016; 4(3):7. DOI: 10.22381/JSME4320161
11. McLaren D., Agyeman J. *Sharing Cities: A Case for Truly Smart and Sustainable Cities*. Cambridge, MA, USA, The MIT Press, 2016; 445. DOI: 10.7551/mitpress/9780262029728.001.0001
12. Akhavan M., Mariotti I., Astolfi L., Canevari A. Coworking Spaces and New Social Relations: A Focus on the Social Streets in Italy. *Urban Science*. 2018; 3(1):2. DOI: 10.3390/urbansci3010002
13. Durante G., Turvani M. Coworking, the Sharing Economy, and the City: Which Role for the ‘Coworking Entrepreneur’? *Urban Science*. 2018; 2(3):83. DOI: 10.3390/urbansci2030083
14. Fathullah A., Willis K. Engaging the Senses: The Potential of Emotional Data for Participation in Urban Planning. *Urban Science*. 2018; 2(4):98. DOI: 10.3390/urbansci2040098
15. Salvia G., Morello E., Arcidiacono A. *Sharing Cities Shaping Cities*. MDPI — Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019; 142. DOI: 10.3390/books978-3-03897-989-0
16. Sanoff H. *Collaborative design. Practices of public participation in shaping the environment of cities*

and towns / translation from English. Vologda, Project group 8, 2015; 170. (rus.).

17. Steiniger S., Poorazizi M.E., Hunter A.J.S. Planning with Citizens: Implementation of an e-Planning Platform and Analysis of Research Needs. *Urban Planning*. 2016; 1(2):49-64. DOI: 10.17645/up.v1i2.607

18. Münster S., Georgi C., Heijne K., Klamert K., Noennig J.R., Pump M. et al. How to involve inhabitants in urban design planning by using digital tools? An overview on a state of the art, key challenges and promising approaches. *Procedia Computer Science*. 2017; 112:2391-2405. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.102

19. Farinosi M., Fortunati L., O'Sullivan J., Paganini L. Enhancing classical methodological tools to foster participatory dimensions in local urban planning. *Cities*. 2019; 88:235-242. DOI: 10.1016/j.cities.2018.11.003

20. Ageeva A.N. Participatory social technologies for municipal making decisions in foreign countries. *Juvenis Scientia*. 2017; 8:38-41. (rus.).

21. Reutov E.V. Urban space and social trust. *Sociology of City*. 2018; 2:55-64. (rus.).

22. Byshova A.B. Development of participative designing ideas and their application in practice. *Architectural Studies*. 2018; 4(16):12-20. (rus.).

23. Raskodchikov A.N. Information and communication interaction between government and society: in search of effective technologies. *Public Opinion Monitoring: Economic and Social Change*. 2017; 2:263-273. DOI: 10.14515/monitoring.2017.2.14 (rus.).

24. Klimova S.G., Klimov T.A. Interactions of urban dwellers with powers: competent participation and problem of intermediaries. *Sociological Research*. 2015; 4:51-57. (rus.).

25. Maslanov D.V. New information and communication technologies for municipal government: crowdsourcing as a tool to improve the interaction between

the “city” and the townspeople. *Urban Studies*. 2015; 4:1-13. DOI: 10.7256/2310-8673.2015.4.17246 (rus.).

26. Safarova M.D. Practice of the institute of public hearings in town planning. *Property Relations in the Russian Federation*. 2015; 9(168):21-35. (rus.).

27. Komarova N.Yu. *Sociological monitoring in the optimization of the management system of social services for the population of the megalopolis: on the example of Moscow: diss. abstract ... cand. of sociological sciences*. Moscow, 2016; 27. (rus.).

28. Stolbov V.P., Starosta P.Yu. *Sociology of urban environment: monograph*. Moscow, INFRA-M, 2017; 174. (rus.).

29. Resch B., Summa A., Zeile P., Strube M. Citizen-centric urban planning through extracting emotion information from twitter in an interdisciplinary space-time-linguistics algorithm. *Urban Planning*. 2016; 1(2):114-127. DOI: 10.17645/up.v1i2.617

30. Resch B., Summa A., Sagl G., Zeile P., Exner J.-P. *Urban Emotions – Geo-Semantic Emotion Extraction from Technical Sensors, Human Sensors and Crowdsourced Data*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing, Cham, 2015; 199-212. DOI: 10.1007/978-3-319-11879-6\_14

31. Kasyanov V.F., Romasheva M.N. Improvement of the internal spaces of residential buildings in Moscow, the results of sociological research. *Real Estate: Economics, Management*. 2018; 4:63-66. (rus.).

32. Starikova M.M. The quality of the urban environment from the position of the housing infrastructure of the microdistricts (for example, Kirov city). *Sociology of the City*. 2018; 3:41-62. (rus.).

33. Chudinova O., Afonina M. Formation of “Urban planning” indicators for “Smart City” concept (on the example of SKOLKOVO, Moscow). *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:02021. DOI: 10.1051/matec-conf/201817002021

Received February 7, 2021.

Adopted in revised form on March 29, 2021.

Approved for publication on April 5, 2021.

**BIONOTES:** **Yulia G. Strashnova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Workshop “Social Infrastructure”; **State Autonomous Institution Research and Design Institute of the General Plan of the City of Moscow (Genplan Institute of Moscow)**; 2/14 2nd Brestskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; ustrashnova@genplanmos.ru;

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

**Tatyana I. Zhukova** — Candidate of Economic Sciences, Leading Researcher; **Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences**; 44/2 Vavilova st., Moscow, 119333, Russian Federation; gukovati@mail.ru.

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

УДК 621.791.05:691.87

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.294-305

## Деформирование стальных стержней периодического профиля с эксплуатационными повреждениями

Е.А. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, А.Е. Мойсейчик, А.М. Язневич, А.А. Яковлев

*Белорусский национальный технический университет (БНТУ);  
г. Минск, Республика Беларусь*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В поперечных и продольных сечениях стержней периодического профиля имеются слои с различными структурно-фазовыми состояниями, физико-механическими характеристиками, напряженным состоянием и сопротивлением внешним воздействиям. Возникновение пластических деформаций в основаниях впадин и других дефектов периодического профиля при растяжении стержней приводит к снижению сопротивляемости коррозионным повреждениям вследствие возникновения гальванических пар между неоднородными участками стержня. Это делает актуальными расчетные и экспериментальные исследования деформированного состояния таких стержней при растяжении.

**Материалы и методы.** Конечно-элементное моделирование процесса деформирования при упругопластической работе стали выполнялось с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS и твердотельных моделей исследуемых стержней. Экспериментальные испытания образцов производились с помощью разрывной машины Р-50 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение» в соответствии с ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался фотофиксацией. После разрушения образцов измерялись геометрические размеры (длины, изменения поперечных сечений), фотографировались характерные виды образцов и их фрагментов, изломы.

**Результаты.** На экспериментальных и конечно-элементных моделях получено, что при упругопластическом деформировании стальных стержней в опасных сечениях изменение угла наклона берегов периодических выступов (выточек) влияет на объем пластически деформируемого материала в основании выточек. Такой анализ моделей в предельном состоянии показал, что значительно сокращается объем пластически деформированного материала при углах выступов у их оснований с осью стержня, близких к 90°. Расчетом установлено, что пластически деформируемая область у основания острых выточек более чем в сто раз меньше, чем соответствующий объем у основания пологих выточек.

**Выводы.** Конечно-элементное моделирование работы на растяжение стальных стержней периодического профиля с квазикомпозитной структурой представляет сложную многофакторную задачу. Во впадинах периодического профиля развиваются пластические деформации. Одновременно в металле выступов сохраняются недеформированные области. Эти зоны имеют разные потенциалы, и между ними возможно возникновение внутренних гальванических токов, приводящих к ускорению коррозионных процессов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** слоистые арматурные стержни, конструктивные и коррозионные дефекты, моделирование дефектов выточками, компьютерное моделирование дефектов, сопротивляемость деформированию, остаточные напряжения, локальная коррозия

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мойсейчик Е.А., Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е., Язневич А.М., Яковлев А.А. Деформирование стальных стержней периодического профиля с эксплуатационными повреждениями // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 294–305. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.294-305

## Deformation steel rods periodic profile with operational damages

Evgeny A. Moiseichik, Yuri V. Vasilevich, Aliaksandr E. Moiseichik,  
Aliaksei M. Yaznevich, Aliaksandr A. Yakauleu

*Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus*

### ABSTRACT

**Introduction.** In the transverse and longitudinal sections of the rods with a periodic profile, there are layers with different structural and phase states, physical and mechanical characteristics, stress state and resistance to external influences. The appearance of plastic deformations in the bases of the depressions and other defects of a periodic profile during stretching of the rods leads to a decrease in the resistance to corrosion damage due to the occurrence of galvanic pairs between

inhomogeneous sections of the rod. This makes the computational and experimental studies of the deformed state of such rods under tension urgent.

**Materials and methods.** The finite element modeling of the deformation process during the elastic-plastic work of steel was carried out using the ANSYS software complex and solid models of the rods under study. Experimental tests of the samples were carried out using an R-50 tensile testing machine with the recording of a load-elongation diagram in accordance with the requirements of GOST 1497. The process of deformation of the samples was displayed by photographic recording. After the destruction of the samples, the geometric dimensions (lengths, changes in cross-sections) were measured, the typical types of samples and their fragments, and fractures were photographed.

**Results.** On experimental and finite-element models, it was found that during elastic-plastic deformation of steel rods in dangerous sections, a change in the angle of inclination of the banks of periodic protrusions (undercuts) affects the volume of plastically deformable material at the base of the undercuts. Such an analysis of the models in the limiting state has shown that the volume of the plastically deformed material is significantly reduced at the angles of the protrusions at their bases with the axis of the rod close to 90°. The calculation established that the plastically deformed area at the base of sharp undercuts is more than a hundred times smaller than the corresponding volume at the base of the gently sloping undercuts. In samples with a group of protrusions, constraint of plastic deformations at the base occurs only for protrusions, the width of which is comparable to the diameter of the rod in weakened sections. The greatest development of equivalent plastic deformations is observed at the base between narrow projections. Damage to the outer layers of quasi-composite rods with a periodic profile causes significant changes in the stress-strain state of the rods under tension.

**Conclusions.** The finite element modeling of the tensile work of steel rods with a periodic profile with a quasi-composite structure is a complex multifactorial problem. Plastic deformations develop in the depressions of the periodic profile. At the same time, undeformed areas remain in the metal of the protrusions. These zones have different potentials and between them the occurrence of internal galvanic currents is possible, leading to the acceleration of corrosion processes.

**KEYWORDS:** layered reinforcing bars, structural and corrosion defects, modeling of defects by grooves, computer modeling of defects, resistance to deformation, residual stresses, localized corrosion

**FOR CITATION:** Moiseichik E.A., Vasilevich Yu.V., Moiseichik A.E., Yaznevich A.M., Yakauleu A.A. Deformation steel rods periodic profile with operational damages. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):294-305. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.294-305 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Для различных железобетонных конструкций широко используют термоупрочненную стальную арматуру [1], сечения которой имеют квазикомпозитное (слоистое) строение [2–6]. Слоистость стержней возникает в процессе металлургического производства [7–10] и определяется различиями в условиях структурообразования в металле приповерхностных и внутренних слоев. В поперечных и продольных сечениях таких стержней формируются слои с различными структурно-фазовыми состояниями и физико-механическими характеристиками [2–6, 11–13]. После охлаждения в потоке стана поверхностные слои стержней могут находиться в растянутом состоянии, а внутренние — в сжатом. В работе [14] показано, что чувствительность термообработанных арматурных стержней класса прочности А600 к коррозионному растрескиванию под напряжением в растворах нитратов в значительной степени определяется химическим составом, типом микроструктуры и уровнем остаточных напряжений. Коррозионная стойкость стальной арматуры более высоких классов прочности ниже, чем для А600 [14]. В работе [15] установлено решающее значение уровня остаточных напряжений на растрескивание термоупрочненных сталей в растворе нитратов. При испытаниях в растворах кислот снижение величины остаточных напряжений неоднозначно воздействует на чувствительность стали к коррозии [15]. В статье [16] изложены результаты исследования распределения остаточных напряжений в стальных арматурных стержнях диаметром 16 и 28 мм разных производителей, изготовленных с помощью термомеханиче-

ского процесса. Авторы делают вывод, что напряжения сжатия существуют во внутренней части поперечного сечения арматурных стержней, а напряжения растяжения — вблизи или даже на их поверхности.

При испытаниях в растворах кислот снижение величины остаточных напряжений неоднозначно влияет на чувствительность стали к коррозии [15]. В работе [17] рассмотрено влияние режимов отпуска на длительную прочность низкоуглеродистых кремнемарганцевых арматурных сталей марок 18ГС, 20ГС и 35ГС при эксплуатации в агрессивных водородсодержащих средах. Сделан вывод, что эффективность различных способов термической обработки арматурных сталей с целью повышения их сопротивляемости коррозионно-механическому разрушению зависит от особенностей агрессивной среды, наличия неоднородной гетерофазной структуры металла арматуры и других факторов.

Развитию коррозионных поражений арматуры способствуют концентраторы напряжений и деформаций. Экспериментальные данные, полученные в работе [18], показали, что в условиях коррозионной усталости металл на дне выточки (концентратора) принимает более низкие значения потенциалов, чем берега выточки. Вследствие этого при соприкосновении с электролитом (растворы солей и т.д.) возникает электрохимический процесс, в котором анодом служит дно концентратора напряжений, а катодом — остальная поверхность стержня. Наличие деформированных участков в стержнях (холоднокатанная арматура, вмятины и т.д.) приводит к появлению разности потенциалов между деформированными и недеформированными участками

стержня [19] и развитию локального коррозионного процесса. Появляющиеся коррозионные ямки (питтинг) особенно опасны при их расположении в зоне растянутых напряжений. В работе [20] установлено, что глубина локального (ямочного) поражения стальной арматуры, работающей в бетоне, в четыре–восемь раз превышает среднюю коррозию. Ямочные поражения арматуры приводят к ускоренному ее коррозионному разрушению [21] и снижению прочности стержней.

Цель настоящей работы — расчетно-экспериментальное исследование:

- деформирования стальных стержней с поверхностным периодическим строением;
- изменения напряженно-деформированного состояния квазикомпозитной стальной арматуры с эксплуатационным дефектом (коррозионная язва).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовать особенности упругопластического деформирования стальных стержней и распределения энергии в опасных сечениях стержня можно на примере моделей с одиночной выточкой (рис. 1) и группой таких выточек, расположенных по длине стержня [22]. При изменении отношения  $a/l$  возможно конечно-элементным методом смоделировать различные дефекты при упругопластической работе стали в процессе растяжения стержня. Конечно-элементное моделирование процесса деформирования при упругопластической работе стали выполним с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS. Твёрдотельные модели исследуемых стержней примем в виде осесимметричных образцов типа Людвига –

Шея (P. Ludwik, R. Scheu) [23]. Классические образцы Людвига – Шея [23] позволяют установить поведение пластичной стали в образцах, стеснение пластической деформации в сечении с конструктивными дефектами. Эксперименты, проведенные Людвигом и Шеем [23], показали, что величина предельной энергии деформации в опасном сечении существенно зависит от наличия концентраторов в образце.

Для построения твердотельных моделей исследуемых образцов типа Людвига – Шея [23] применялась программа геометрического моделирования SolidWorks.

На рис. 2 приведен стержень круглого сечения с различной вариацией концентраторов. Выполненные модели сохранялись в формате «.x\_t» (формат Parasolid), который впоследствии используется для импорта сторонней геометрии в ANSYS. Вид используемой конечно-элементной сетки представлен на примере образца *b* на рис. 3. Модель выполнена из 20 узловых гексаэдральных элементов с их измельчением в области выточки. Размер конечных элементов в области концентрации не превышает 0,4 мм.

В процессе расчетов используется критерий (теория) прочности Губера – Мизеса, который позволяет достаточно точно прогнозировать появление стадии пластичности для упругопластического моделирования и удовлетворительно отображает предельное состояние пластичных сталей [22]. Материал расчетных моделей образцов наделялся следующими характеристиками: плотность материала 7850 кг/м<sup>3</sup>; модуль Юнга  $2 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона 0,3; полилинейная диаграмма растяжения (рис. 4). Для расчета применялись данные истинной диаграммы растяжения, учитывающей уменьшение

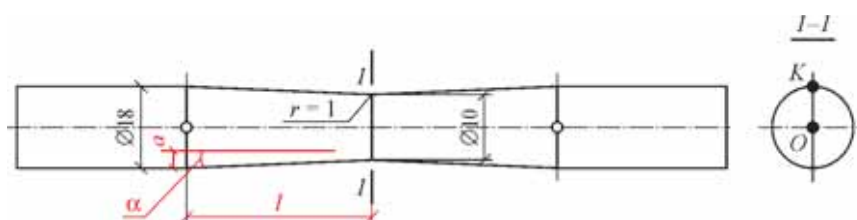


Рис. 1. Схемы определения уклона берегов конструктивного надреза и расположения точек опасного сечения (ослабленного сечения) I–I

Fig. 1. Schemes for determining the slope of the banks of the structural notch and the location of points of the dangerous section (weakened section) I–I

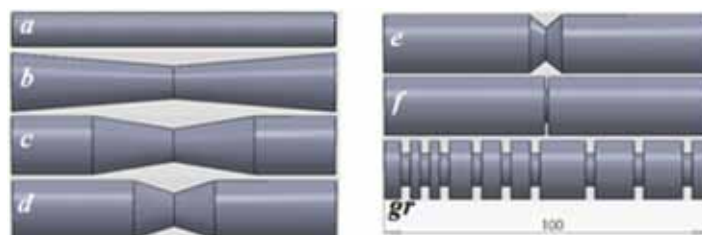


Рис. 2. Вид твердотельных моделей с одиночными (a–f) и групповыми (gr) вырезами

Fig. 2. View of solid models with single (a–f) and group (gr) cuts

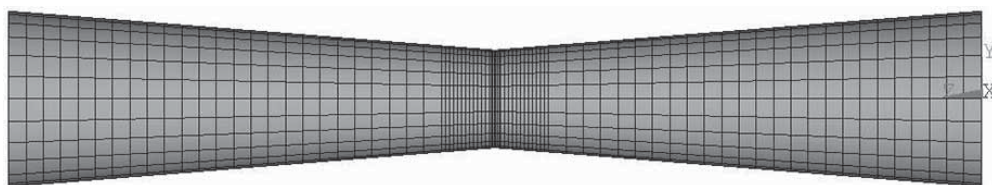


Рис. 3. Вид конечно-элементной модели образца на участке конструктивного изменения формы

Fig. 3. View of the finite element model of the sample in the area of structural shape change

поперечного сечения в процессе нагружения образца. В стадии пластической работы малоуглеродистая сталь подвергается большим деформациям. Программа ANSYS позволяет учитывать большие деформации при нелинейном поведении материалов. При расчете учитывались также следующие факторы: 1) увеличивающаяся с постоянным шагом нагрузка, с максимальным значением, соответствующим достижению предела прочности в области концентрации с точностью до 0,5 % от  $\sigma_b$ , и 2) жесткое защемление другого торца образца (в декартовой системе координат). Стержень нагружался на свободном торце (соответствует закреплению в подвижной траверсе испытательной машины). Значения прикладываемых нагрузок приведены в табл. 1. Для корректного решения в настройках решателя включена опция учета больших деформаций (Large Displacement Static).

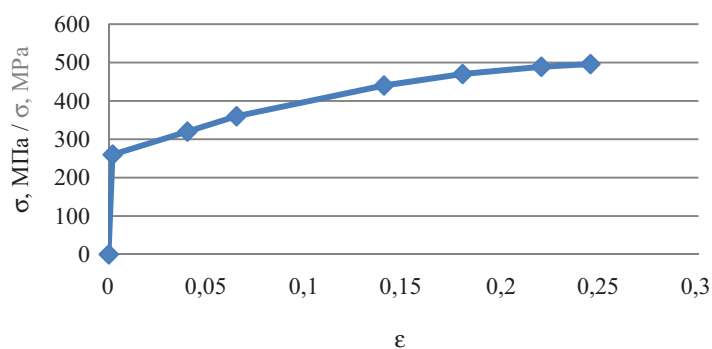
Объем пластически деформированного металла в основании выточек определялся ручным подсчетом количества конечных элементов с эквивалентным напряжением, превышающим предел текучести стали.

Экспериментальные испытания образцов производились с использованием разрывной машины

Р-50 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение». Испытания и обработка экспериментальных данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался фотофиксацией. После разрушения образцов измерялись геометрические размеры (длины, изменения поперечных сечений), фотографировались характерные виды образцов и их фрагментов, изломы.

За основу для разработки конечно-элементного моделирования ямочных коррозионных поражений нами приняты арматурные стержни с номинальными диаметрами 12, 25 и 32 мм. Твердотельная модель стержней принималась в соответствии с рис. 5. Эффективность использования метода конечных элементов и достоверность результатов расчета напрямую зависят от точности описания геометрии изделия. В случае арматурного стержня процесс моделирования усложняется несимметричностью сечения. Вследствие несимметричности изделия, основным критерием оптимизации служит требование по уменьшению длины модели. Расчет с использованием метода конечных элементов осуществляли в программной среде ANSYS.

Физико-механические характеристики слоев задавались диаграммами деформирования путем вве-

Рис. 4. Вид экспериментальной диаграммы  $\sigma$ – $\epsilon$  стали образцов  $a$ – $f$  и  $gr$ Fig. 4. View of the experimental diagram  $\sigma$ – $\epsilon$  of steel samples  $a$ – $f$  and  $gr$ Табл. 1. Величины нагрузок на образцы  $a$ – $f$ Table 1. Values of loads on sample  $a$ – $f$ 

| Образец типа / Sample type                      | $a$  | $b$  | $c$  | $d$  | $e$  | $f$  |
|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Нагрузка $P_{\max}$ , кН / Load $P_{\max}$ , kN | 31,3 | 33,6 | 35,6 | 39,4 | 43,2 | 47,3 |

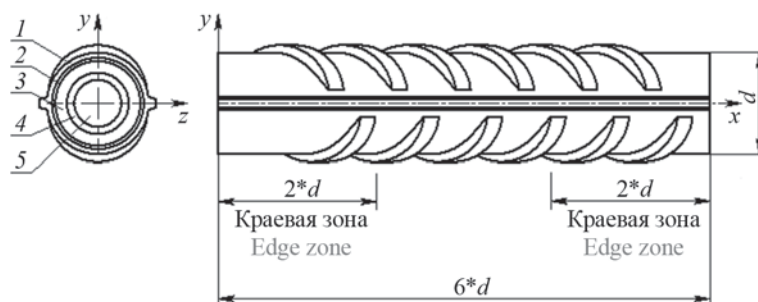


Рис. 5. Форма и структура твердотельной модели: 1–5 — основные визуально различимые по объему изделия слои материала

Fig. 5. The shape and structure of the solid model: 1–5 — the main layers of material visually distinguishable by the volume of the product

дения координат ключевых точек. С целью обеспечения передачи внутренних силовых факторов между слоями применяли процедуру склейки. Для расчетов с учетом пластических деформаций и при существенном градиенте напряжений в малых объемах использовался конечный элемент (КЭ) VISCO89 с 20 узловыми точками. Разбиение на сетку КЭ осуществлялось в автоматическом режиме с предварительным указанием количества КЭ на характерных ребрах модели. Для внутренних слоев использовались призматические элементы, так как тела представлены объемами простой формы. Наружный слой вследствие развитой его поверхности при наличии острых углов в месте стыка концов выступающих ребер с цилиндрической поверхностью разбивали на тетраэдральные КЭ. Для снижения эффекта неоднородности поля напряжений в местах сопряжения поверхностей применяли измельчение сетки.

Приращение во времени прикладываемой к образцу нагрузки производилось ступенями с постоянным шагом, равным 10 МПа распределенного усилия. Для обеспечения равномерности передачи нагрузки

по всем слоям усилия прикладывали распределенными по площади торцевых поверхностей. Максимальная величина давления принималась не выше временного сопротивления наиболее прочного слоя в образце. В качестве расчетной модели использовали стержневые конструкции, состоящие из набора цилиндрических вставок с различными физико-механическими свойствами. Поведение материала для каждого из слоев задавалось диаграммой деформирования. За расчетную модель был принят трехслойный стержень с коррозионной «язвой», которую моделировали в форме выреза сферического сегмента радиусом 30 мм и глубиной проникновения в тело стержня 3,5 мм (рис. 6). Физико-механические характеристики материалов задавали по результатам лабораторного испытания образцов при осевом растяжении. Для их определения исходный арматурный стержень обрабатывали с обильным поливом охлаждающей жидкостью до нужного диаметра слоя. Растяжение образца задавалось перемещением точек правой торцевой поверхности (рис. 6) на величину 1 мм ( $uz = 1$  мм).

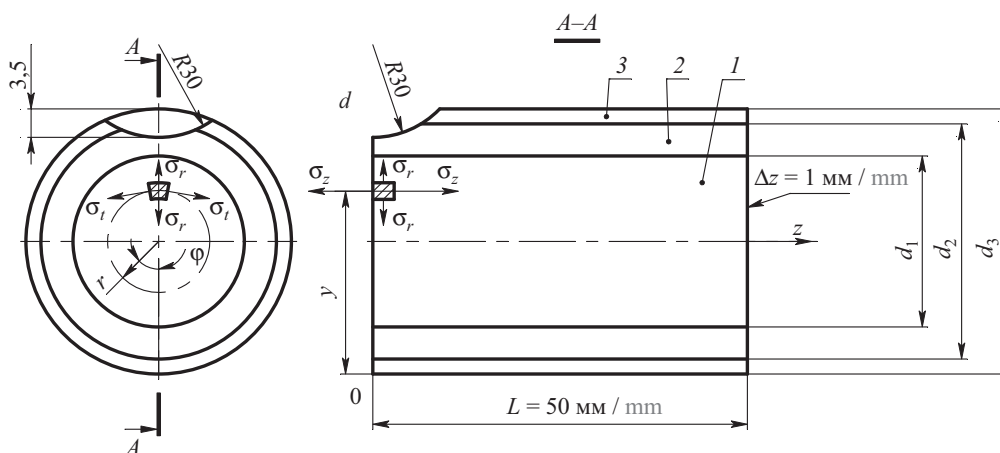


Рис. 6. Геометрия стержня с коррозионной язвой: 1 — внутренний слой; 2 — промежуточный слой; 3 — наружный слой

Fig. 6. Geometry of the rod with a corrosion ulcer: 1 — the inner layer; 2 — intermediate layer; 3 — outer layer

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты конечно-элементного расчета деформаций и плотности накапливаемой энергии в окрестности сечения  $I-I$  (рис. 1) при нагружении моделей  $a-f$  представлены в табл. 2, 3. На рис. 7 приведено распределение эквивалентных пластических деформаций в предельном состоянии растянутых образцов серии  $gr$ . Как видно из эпюр табл. 2, изменение угла  $\alpha$  наклона берегов выточек влияет на объем пластически деформируемого материала (образцы  $b-e$ ) в ос-

новании выточки. По данным конечно-элементного расчета образцов  $b-e$  в стадии предразрушения получено, что особенно значительно сокращается этот объем при углах выточек  $\alpha$ , близких к  $90^\circ$ . Расчет показал, что пластически деформируемая область у основания острых выточек более чем в сто раз меньше, чем соответствующий объем у основания пологих выточек. В образцах серии  $gr$  (рис. 7) стеснение пластических деформаций в основании происходит лишь для выточек, ширина которых сопоставима с диаметром стержня в ослабленных сечениях.

**Табл. 2.** Эпюры распределения эквивалентных пластических деформаций в предельном состоянии растянутых образцов

**Table 2.** Diagrams of the distribution of equivalent plastic deformations in the limiting state of stretched specimens

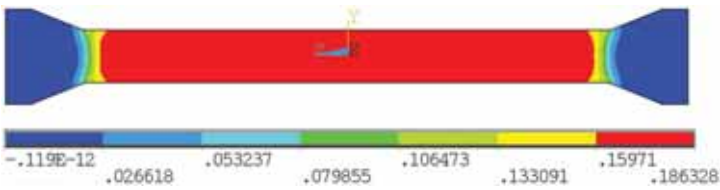
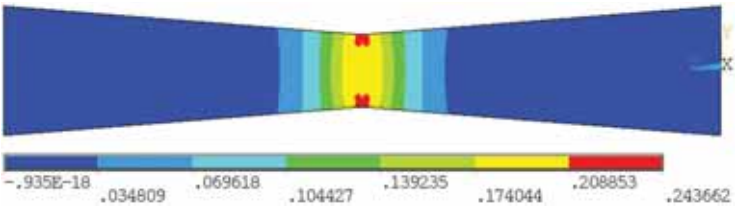
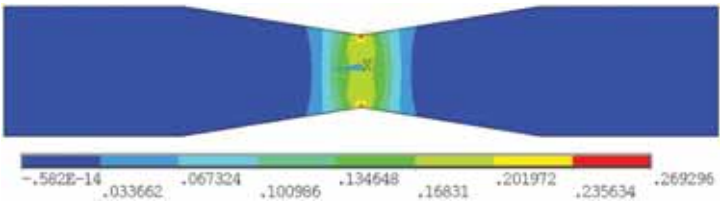
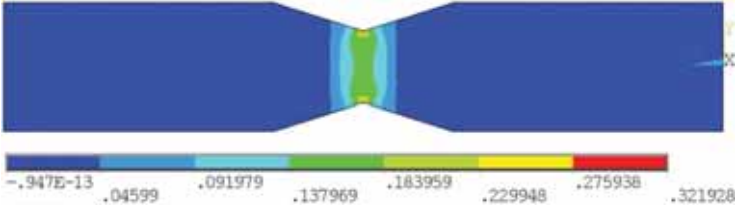
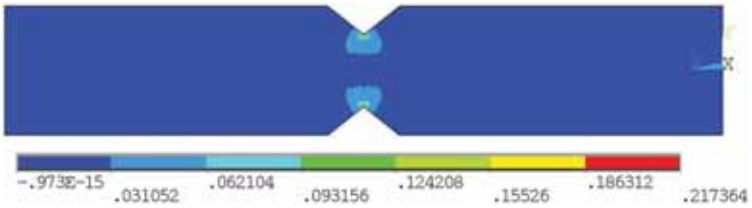
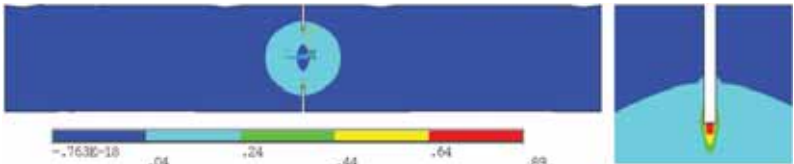
| Тип образца<br>Sample type | Эпюра распределения пластических деформаций в опасной зоне<br>Diagram of the distribution of plastic deformations in the hazardous area |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>a</i>                   |                                                       |
| <i>b</i>                   |                                                      |
| <i>c</i>                   |                                                     |
| <i>d</i>                   |                                                     |
| <i>e</i>                   |                                                     |
| <i>f</i>                   |                                                     |

Табл. 3. Эпюры плотности энергии при пластическом деформировании образцов  $a-f$  в окрестности ослабленного сечения

Table 3. Diagrams of energy density during plastic deformation of samples  $a-f$  in the vicinity of the weakened section

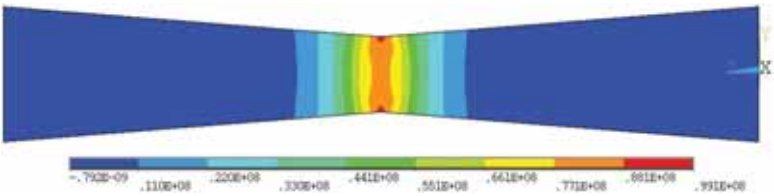
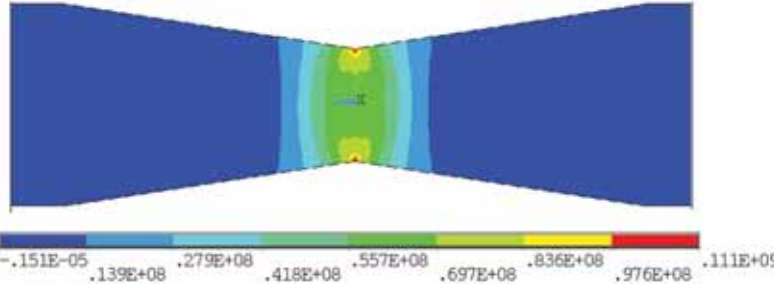
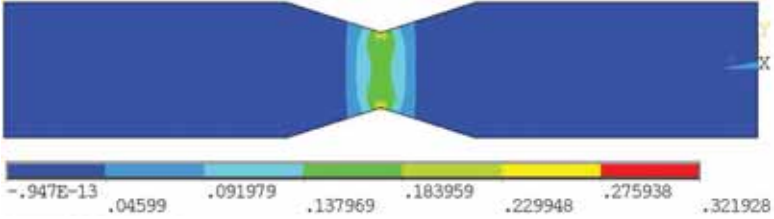
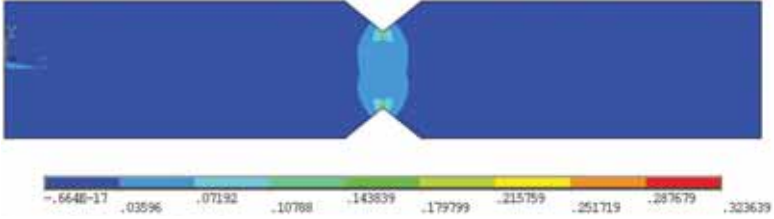
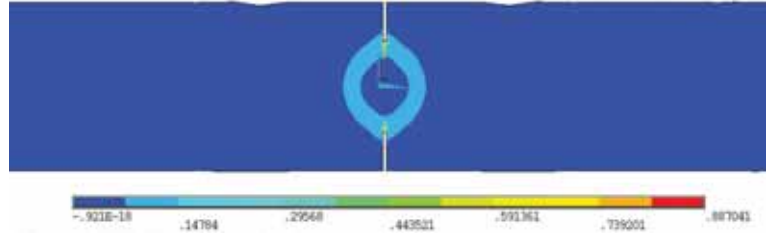
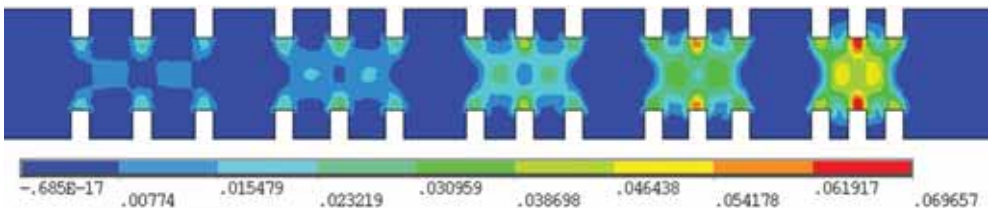
| Тип образца<br>Sample type | Эпюры распределения плотности энергии при развитии пластических деформаций<br>Energy density distribution plots during the development of plastic deformations               |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b$                        |                                                                                            |
| $c$                        |                                                                                            |
| $d$                        |                                                                                           |
| $e$                        |                                                                                          |
| $f$                        | <br> |

Рис. 7. Распределения эквивалентных пластических деформаций в предельном состоянии растянутых образцов серии  $gr$

Fig. 7. Distribution of equivalent plastic deformations in the limiting state of stretched samples of the  $gr$  series

Наибольшее развитие эквивалентных пластических деформаций наблюдается в выточках между узкими ребрами.

Квазистатические испытания стальных образцов, отображающих расчетные модели (рис. 2), показали, что изменения остроты выточки наиболее заметно сказались на изломах образцов.

Рассчитанные в ANSYS распределения плотности энергии  $a-f$  в окрестности сечения  $I-I$  образцов приведены в табл. 3, из которой следует, что увеличение остроты концентраторов приводит к значительной локализации плотности энергии в корне надреза. В этих зонах возникают наиболее благоприятные условия для зарождения начальных трещин при статическом и усталостных нагружениях, развития питтинговой коррозии.

Из рис. 8 следует, что в изломах образцов доля скола уменьшалась от образца  $a$  к образцу  $f$ . Растяжение образца  $f$  сопровождалось значительным стеснением пластических деформаций, вовлечением в пластическую работу примыкающих к выточке частей стержня. В изломе этого образца наблюдается развитие начальной кольцевой трещины примерно до половины диаметра ослабленного сечения с последующим доломом образца. Излом образцов серии  $gr$  (рис. 9) произошел в выточке, для которой характерны наибольшие эквивалентные пластические деформации. Узкие групповые выточки, примыкающие к зоне излома образца серии  $gr$ , являются одним из способов снижения концентрации напряжений в стержне [22, 23].

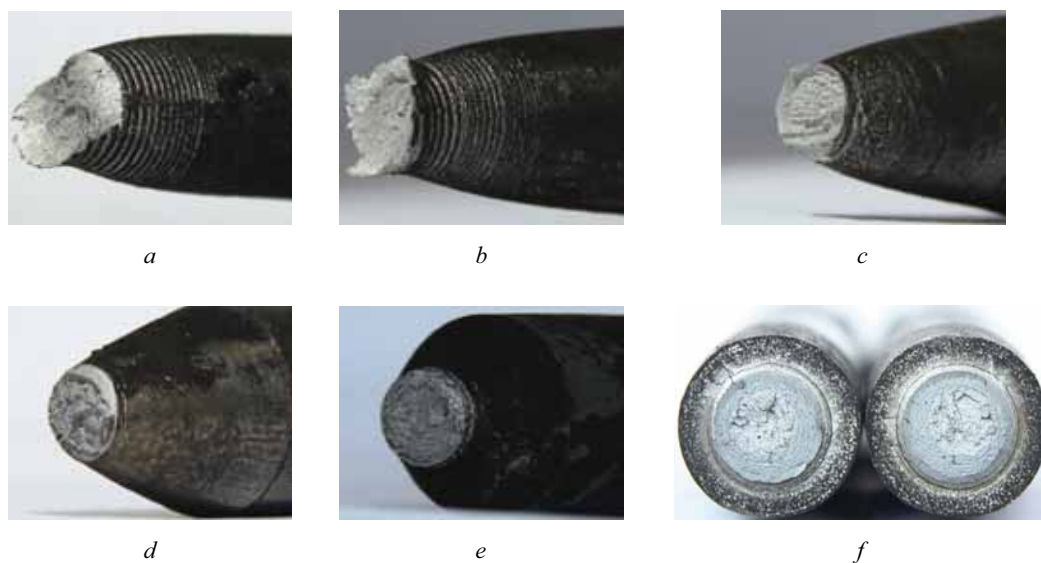


Рис. 8. Виды изломов образцов типа  $a-f$

Fig. 8. Kinds of breaks of samples of type  $a-f$



Рис. 9. Вид излома образца типа  $gr$  и деформированных зон, примыкающих к излому

Fig. 9. Kind of fracture of a sample of the  $gr$  type and deformed zones, adjacent to the break

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчета определялись компоненты тензоров напряжений, деформаций, распределение энергии деформирования, строились их распределения по слоям образца. В табл. 4 для примера приведены распределения осевых напряжений  $\sigma_z$  по объ-

ему стержня (красный цвет — максимальные значения, фиолетовый — минимальные).

В итоге расчета получено, что изменение свойств наружных слоев путем термической обработки и коррозионного повреждения вносит изменения в характер распределения напряжений в локальном объеме непосредственно в окружении дефекта. Границы

зоны влияния для образца зависят от диаметра стержня и размеров слоев. Численные исследования позволили установить, что зона влияния коррозионной язвы составляет 30–40 мм. Так, для стержня диаметром 12 мм изменения пронизывают большую часть его диаметра.

Изменения в напряженном состоянии объясняются двумя факторами: 1) концентрацией напряжений в окрестности «язвы»; 2) неравномерным распределением жесткости по сечению стержня и, как

следствие, смещением нейтральной линии относительно геометрического центра тяжести сечения, т.е. появлением эффекта внецентренного растяжения-сжатия, что подтверждено искривлением оси стержня в деформированном состоянии.

Для гладкого стержня при осевом растяжении с величиной деформаций 2 % максимальные осевые напряжения по слоям не зависят от диаметра стержня. Данные по компонентам напряжений по слоям всех типов стержней представлены в табл. 5.

Табл. 4. Распределение компонент тензора напряжений по стержню (осевые напряжения  $\sigma_z$ )

Table 4. Distribution of stress tensor components over the bar volume (axial stresses  $\sigma_z$ )

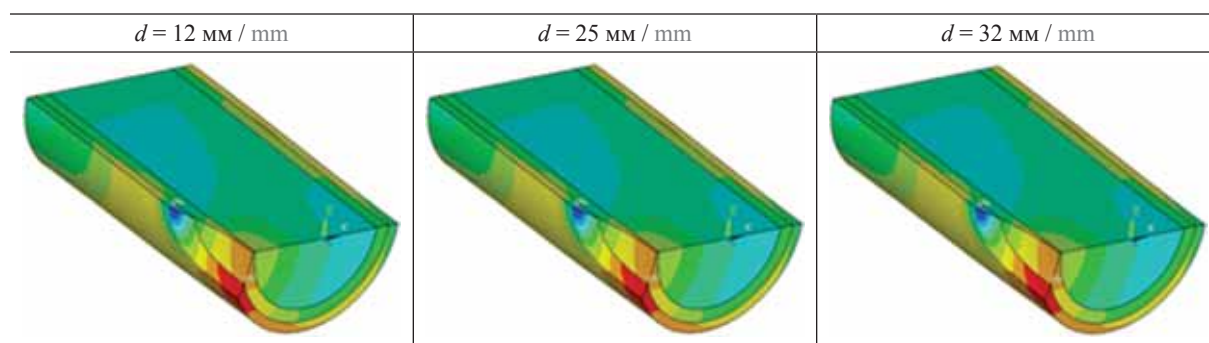


Табл. 5. Распределение напряжений  $\sigma_z$  по слоям образца с коррозионной язвой

Table 5. Distributions of stresses  $\sigma_z$  by layers of a sample with a corrosion pit

| Тип стержня<br>Rod type              | Диаметр стержня, мм<br>Rod diameter, mm | Напряжение по слоям, МПа<br>Layer stress, MPa |         |          |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------|----------|
|                                      |                                         | 1                                             | 2       | 3        |
| Коррозионная «язва»<br>Corrosion pit | 12                                      | 410/410                                       | 500/280 | 695/-180 |
|                                      |                                         | 440/580                                       | 570/730 | -522/744 |
|                                      | 25                                      | 410/410                                       | 540/510 | 680/420  |
|                                      |                                         | 410/530                                       | 485/710 | 192/740  |
|                                      | 32                                      | 410/410                                       | 580/500 | 650/430  |
|                                      |                                         | 390/530                                       | 500/645 | 510/722  |

Изложенный в статье материал позволяет сделать следующие выводы.

1. Конечно-элементное моделирование работы на растяжение стального арматурного стержня с многослойной структурой представляет сложную многофакторную механико-химическую задачу. Одновременно в металле выступов сохраняются недеформированные области. Эти зоны имеют разные потенциалы, и между ними возможно возникновение внутренних гальванических токов, приводящих к ускорению коррозионных процессов.

2. Конечно-элементный анализ моделей в предельном состоянии продемонстрировал, что значительно сокращается объем пластически деформированного материала при углах выступов у их оснований с осью стержня, близких к 90°. Сопоставление объемов пластически деформированных областей у основания впадин стержней периодического

профиля показало, что пластически деформированный объем в основании острых выточек более чем в сто раз меньше, чем соответствующий объем у оснований пологих выточек. В образцах с группой выступов стеснение пластических деформаций в основании происходит лишь для выступов, ширина которых сопоставима с диаметром стержня в ослабленных сечениях. Наибольшее развитие эквивалентных пластических деформаций наблюдается в основании между узкими выступами.

3. Воздействия на наружные слои стержней периодического профиля (сварочные воздействия, коррозионные повреждения) вносят изменения в характер распределения напряжений в объеме стержня у дефекта. Границы зоны влияния для образца зависят от диаметра стержня и размеров слоев. Установлено, что зона изменения напряженного состояния для коррозионной язвы составляет 30–40 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М., 2000. 256 с.
2. Козлов Э.В., Плевков А.В., Юрьев А.Б., Громов В.Е. Кривые течения, механизмы разрушения и размерный эффект и малоуглеродистых низколегированных сталей с квазикомпозитной структурой // Известия высших учебных заведений. Физика. 2002. Т. 45. № 3. С. 49–60.
3. Юрьев А.Б., Чинокалов В.Я., Ефимов О.Ю., Мыскова Н.В., Прокофьева О.С. Структура термически упрочненной стержневой арматуры // Технология металлов. 2005. № 9. С. 5–7.
4. Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б., Ефимов О.Ю., Михаленко И.А., Мыскова Н.В. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры // Технология металлов. 2005. № 10. С. 15–19.
5. Большаков В.И., Шеремет В.А., Чайковская А.О., Гунькин И.А., Чайковский О.А. Взаимосвязь структурной неоднородности термически упрочненной арматуры с изменением твердости по сечению стержней // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. Днепропетровск, 2006. С. 159–167.
6. Balogun S.A., Lawal G.I., Sekunowo O.I., Adeosun S.O. Influence of finishing temperature on the mechanical properties of conventional hot rolled steel bar // Journal of Engineering and Technology Research. 2011. Vol. 3 (11). Pp. 307–313.
7. Babich V.K. Technical fundamentals of the hardening and tempering of heavy forms of rolled product // Metal Science and Heat Treatment. 1987. Vol. 29. Pp. 836–838. DOI: 10.1007/BF00707753
8. Узлов И.Г., Савенков В.Я., Поляков С.Н. Термическая обработка проката. Киев : Техніка, 1981. 159 с.
9. Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В., Мадатян С.А., Ивченко А.В. Высокопрочная арматурная сталь. М. : Металлургия, 1986. 272 с.
10. Натапов А.С., Левченко Л.Н., Баскин С.Л. Производство эффективных арматурных профилей для железобетона. М. : Металлургия, 1992. 208 с.
11. Большаков В.И., Чайковская А.О., Чайковский О.А., Шеремет В.А., Гунькин И.А., Журавлев И.И. Особенности изменения свойств по сечению термически упрочненной арматуры после повторного нагрева // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2004. № 3. С. 71–74.
12. Firat F.K. Mechanical properties of reinforcing steel in r/c: uncertainty analysis and proposal of a new material factor // Arabian Journal for Science and Engineering. 2016. Vol. 41. Pp. 4019–4028. DOI: 10.1007/s13369-016-2077-7
13. Ажержмачев Г.А., Меннанов Э.М., Абдурахманов А.З. Сварные стыки продольной арматуры класса А500С в каркасах сейсмостойких зданий и сооружений // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2009. № 4 (78). С. 139–142.
14. Сергеев Н.Н., Извольский В.В., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Агеев Е.В. и др. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 22 (2). С. 52–63. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63
15. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Агеев Е.В. Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства арматурного проката // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 23 (2). С. 29–52. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52
16. Volkwein A., Osterminski K., Meyer F., Gehlen C. Distribution of residual stresses in reinforcing steel bars // Engineering Structures. 2020. Vol. 223. P. 111140. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111140
17. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Пантюхин О.В. Влияние режимов отпуска на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 8. С. 94–107.
18. Рябченков А.В. Коррозионно-усталостная прочность стали. М. : Машгиз, 1953. 180 с.
19. Зарецкий Е.М. Влияние деформации на потенциалы металлов // Журнал прикладной химии. 1951. Т. XXIX. № 6. С. 615–623.
20. González J.A., Andrade C., Alonso C., Feliu S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. Issue 2. Pp. 257–264. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00006-2
21. Busba E. Effect of localized corrosion of steel on chloride-induced concrete cover cracking in reinforced concrete structures : graduate theses and dissertations. 2013. URL: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/4872>
22. Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е. Закономерности деформирования образцов типа Людвика–Шея и образцов с групповыми выточками // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. Минск, 2016. № 31. С. 238–241.
23. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. М. ; Л. : ОНТИ, 1935. 418 с.

Поступила в редакцию 22 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 1 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 11 марта 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Евгений Алексеевич Мойсейчик — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры мостов и тоннелей; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; [emoisseitchik@mail.ru](mailto:emoisseitchik@mail.ru);

Юрий Владимирович Василевич — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и механики материалов; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 285557; [tmech@bntu.by](mailto:tmech@bntu.by);

Александр Евгеньевич Мойсейчик — кандидат технических наук, инженер; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; [tmech@bntu.by](mailto:tmech@bntu.by);

Алексей Михайлович Язневич — соискатель ученой степени; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; [sato@inbox.ru](mailto:sato@inbox.ru);

Александр Александрович Яковлев — старший преподаватель кафедры мостов и тоннелей; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 972401; [mit\\_ftk@bntu.by](mailto:mit_ftk@bntu.by).

## REFERENCES

1. Madatyan S.A. *Reinforcement for reinforced concrete structures*. Moscow, 2000; 256. (rus.).
2. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A., Klopotov A.A., Koneva N.A. Influence of the substructure type on the carbon redistribution in martensitic steel in the course of plastic deformation. *Russian Physics Journal*. 2002; 45(3):49-60. (rus.).
3. Yuriev A.B., Chinokalo V.Ya., Efimov O.Yu., Myskova N.V., Prokofieva O.S. The structure of thermally hardened bar reinforcement. *Tehnologia Metallov*. 2005; 9:5-7. (rus.).
4. Chinokalo V.Ya., Yuriev A.B., Efimov O.Yu., Mikhaleiko I.A., Myskova N.V. Strength of structural layers in the section of thermally hardened reinforcement. *Tehnologia Metallov*. 2005; 10:15-19. (rus.).
5. Bol'shakov V.I., Sheremet V.A., Chaikovskaya A.O., Gun'kin I.A., Tchaikovskiy O.A. Relationship between the structural heterogeneity of thermally hardened reinforcement and the change in hardness along the cross-section of the rods. *Construction, Materials Science, Mechanical engineering : collection of articles scientific works*. Dnepropetrovsk, 2006; 159-167. (rus.).
6. Balogun S.A., Lawal G.I., Sekunowo O.I., Adeosun S.O. Influence of finishing temperature on the mechanical properties of conventional hot rolled steel bar. *Journal of Engineering and Technology Research*. 2011; 3(11):307-313.
7. Babich V.K. Technical fundamentals of the hardening and tempering of heavy forms of rolled product. *Metal Science and Heat Treatment*. 1987; 29:836-838. DOI: 10.1007/BF00707753
8. Uzlov I.G., Savenkov V.Ya., Polyakov S.N. *Heat treatment of rolled products*. Kiev, Technika, 1981; 159. (rus.).
9. Kugushin A.A., Uzlov I.G., Kalmykov V.V., Madatyan S.A., Ivchenko A.V. *High-strength reinforcing steel*. Moscow, Metallurgy, 1986; 272. (rus.).
10. Natapov A.S., Levchenko L.N., Baskin S.L. *Production of efficient reinforcing profiles for reinforced concrete*. Moscow, Metallurgy, 1992; 208. (rus.).
11. Bol'shakov V.I., Chaikovskaya A.O., Chaikovskiy O.A., Sheremet V.A., Gun'kin I.A., Zhuravlev I.I. Peculiarities of changing properties over the cross section of thermally hardened reinforcement after re-heating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2004; 3:71-74. (rus.).
12. Firat F.K. Mechanical properties of reinforcing steel in r/c: uncertainty analysis and proposal of a new material factor. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016; 41:4019-4028. DOI: 10.1007/s13369-016-2077-7
13. Azhermachev G.A., Mennanov E.M., Abdurakhmanov A.Z. Welded joints of longitudinal reinforcement class A500C in frames of earthquake-resistant buildings and structures. *News of Donbass National Academy of Business and Architecture*. 2009; 4(78):139-142. (rus.).
14. Sergeev N.N., Izvolsky V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. et al. Influence of microstructural factors and heat treatment on the corrosion resistance of A600 class reinforcing steel. *Bulletin of the South-West State University*. 2018; 22(2):52-63. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63 (rus.).
15. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Influence of modes of high-temperature thermomechanical treatment on the mechanical properties of reinforcing bars. *Bulletin of the South-West State University*. 2019; 23(2):29-52. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52 (rus.).
16. Volkwein A., Osterminski K., Meyer F., Gehlen C. Distribution of residual stresses in reinforcing steel bars. *Engineering Structures*. 2020; 223:111140. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111140

17. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Pantyukhin O.V. Influence of tempering modes on long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media. *Izvestiya TulGU. Technical science*. 2018; 8:94-107. (rus.).
18. Ryabchenkov A.V. *Corrosion-fatigue strength of steel*. Moscow, Mashgiz, 1953; 180. (rus.).
19. Zaretsky E.M. Influence of deformation on the potentials of metals. *Journal of Applied Chemistry*. 1951; XXIX(6):615-623. (rus.).
20. González J.A., Andrade C., Alonso C., Feliu S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*. 1995; 25(2):257-264. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00006-2
21. Busba E. *Effect of Localized Corrosion of Steel on Chloride-Induced Concrete Cover Cracking in Reinforced Concrete Structures*. Graduate Theses and Dissertations. 2013. URL: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/4872>
22. Vasilevich Yu.V., Moiseichik A.E. Regularities of deformation of specimens of the Ludwik-Shea type and specimens with group grooves. *Theoretical and Applied Mechanics : International Scientific and Technical Collection*. Minsk, 2016; 31:238-241. (rus.).
23. Gubkin S.I. *Plastic deformation of metals*. Moscow; Leningrad, ONTI, 1935; 418. (rus.).

Received December 22, 2020.

Adopted in revised form on March 1, 2021.

Approved for publication on March 11, 2021.

**BIONOTES:** **Evgeny A. Moiseichik** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Bridges and Tunnels; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; [emoiseichik@mail.ru](mailto:emoiseichik@mail.ru);

**Yuri V. Vasilevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Mechanics of Materials; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 285557; [tmech@bntu.by](mailto:tmech@bntu.by);

**Aliaksandr E. Moiseichik** — Candidate of Technical Sciences, engineer; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; [tmech@bntu.by](mailto:tmech@bntu.by);

**Aliaksei M. Yaznevich** — degree of scientist seeker; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; [sato@inbox.ru](mailto:sato@inbox.ru);

**Aliaksandr A. Yakauleu** — Senior Lecturer of the Department of Bridges and Tunnels; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 972401; [mit\\_ftk@bntu.by](mailto:mit_ftk@bntu.by).

## Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии

Л.Ю. Ступишин<sup>1</sup>, М.Л. Мошкевич<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрено развитие вариационных постановок задач строительной механики на примере задач изгиба балок. Существующие вариационные подходы, нелинейная теория изгиба балок, как и классические методы сопротивления материалов, не в состоянии объяснить ряд вопросов, связанных с несовпадением результатов теории и экспериментов, например, в задачах чистого и поперечного изгиба балок. Для их решения используются вариационные формулировки и критерии критических уровней внутренней потенциальной энергии деформации, развиваемые авторами.

**Материалы и методы.** Для внутренней потенциальной энергии деформируемого тела записывается условие стационарности на критических уровнях, позволяющее получить уравнения состояния, описывающие самонапряжение конструкции. Показано, что математическая модель состояния конструкции на критических уровнях потенциальной энергии деформации приводит к задаче на собственные значения. Обсуждаются величины, характеризующие постановку задач при формулировании в обобщенных усилиях и обобщенных перемещениях.

**Результаты.** На примерах задач чистого изгиба и прямого поперечного изгиба простых балок сосредоточенной силой показаны постановка задачи и методика ее решения. Приведены эпюры прогибов, изгибающих моментов и даны величины амплитудных значений в середине пролета. Определено, что для простых балок в задачах чистого изгиба и поперечного изгиба максимальные величины моментов достигаются в середине пролета балки, как и в эксперименте.

**Выводы.** Проведено обсуждение полученных результатов и сравнение с данными, приведенными в теории гибких стержней. Отмечено, что опасное сечение в двух подходах, имеющих разную физическую природу, располагается в середине пролета балки. Показаны границы расхождения результатов для перемещений, моментов внутренних усилий и напряжений. Результаты, получаемые по линейной теории сопротивления материалов, приводят к существенному запасу прочности. Рассмотрены перспективы развития теории критических уровней внутренней потенциальной энергии деформации и возможности приложения методики в задачах строительной механики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** балки, чистый изгиб, поперечный изгиб, критические уровни энергии, вариационные методы, самонапряжение, прочность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 306–316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316

## Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels

Leonid Yu. Stupishin<sup>1</sup>, Mariya L. Moshkevich<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article is devoted to the development of variational formulations of structural mechanics problems using the example of the problems of bending beams. The existing variational approaches, the nonlinear theory of bending of beams, as well as the classical methods of resistance of materials, are not able to explain a number of issues related to the discrepancy between the results of theory and experiments, for example, in problems of pure and transverse bending of beams. To solve these issues, variational formulations and the criterion of critical levels of the internal potential energy of deformation, developed by the authors, are used.

**Materials and methods.** For the internal potential energy of a deformed body, the stationarity condition at critical levels is written, which makes it possible to obtain equations of state that describe the self-stress of the structure. It is shown that a mathematical model of the state of a structure at critical levels of potential energy of deformation leads to an eigenvalue problem. The quantities characterizing the formulation of problems when formulating in generalized efforts and generalized displacements are discussed.

**Results.** Using the examples of problems of pure bending and direct transverse bending of simple beams by a concentrated force, the formulation of the problem and the method of its solution are shown. The diagrams of deflections and bending moments are given, and the magnitudes of the amplitude values in the middle of the span are given. It is shown that for

simple beams in problems of pure bending and transverse bending, the maximum values of the moments are achieved in the middle of the beam span, as in the experiment.

**Conclusion.** The results are discussed and compared with the data obtained in the theory of flexible rods. It is noted that the dangerous section in two approaches having different physical nature is located in the middle of the beam span. The boundaries of discrepancy between the results for displacements, moments of internal forces and stresses are shown. It is noted that the results obtained according to the linear theory of strength of materials lead to a significant margin of safety. The prospects for the development of the theory of critical levels of internal potential energy of deformation, and the possibility of applying the technique to problems of structural mechanics are discussed.

**KEYWORDS:** beams, pure bending, transverse bending, critical levels of energy, variational methods, self-stress, strength

**FOR CITATION:** Stupishin L.Yu., Moshkevich M.L. Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):306-316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Первое письменное исследование задачи об изгибе балки найдено в записках Леонардо да Винчи. В результате проведенного эксперимента он установил, что в двухопорной балке постоянного поперечного сечения «более всего изогнута» та часть, которая располагается на наибольшем удалении от опор [1]. Работы Бернулли, Эйлера и их последователей развили теорию изгиба балок, которая вошла в учебники по сопротивлению материалов и считается классической.

Интерес к изучению математической модели балки не ослабевает и в настоящее время [2, 3], поскольку формулировка задачи отражает наиболее общие закономерности закона сохранения энергии. Нелинейным задачам изгиба гибких стержней посвящены учебники В.А. Светлицкого, П.А. Жилина и многих других исследователей, где делаются попытки уточнить классические модели изгиба стержней. Причиной такого интереса отчасти является тот факт, что общность постановки задачи служит развитию теории вариационного исчисления [4], решению нелинейных дифференциальных задач [5–8] и других областей математики.

Вместе с тем физическая модель — общая для большого количества технических приложений и позволяет развивать теорию динамических задач [9–11], композитных конструкций [12, 13], метод конечных элементов [14–16], конструктивно нелинейных задач и задач контакта балок с упругим основанием [17–19], и прочие направления строительной механики.

Самой популярной в технических приложениях стала формулировка задачи, предложенная С.П. Тимошенко, в рамках которой активно изучаются динамические задачи [20–26], строится теория расчета композитных балок [27–29], теория метода конечных элементов [30], балок на упругом основании [31, 32] и др.

Несмотря на хорошую изученность моделей изгиба балки, многие важные для технических приложений вопросы остаются не объясненными. Например, в модели чистого изгиба простой балки все сечения являются равноопасными, хотя в эксперименте дефекты, характеризующие разрушение балки, появляются посередине участка чистого изгиба. В за-

даче плоского поперечного изгиба простой балки сосредоточенной силой опасное сечение, согласно классической теории, расположено под точкой приложения нагрузки. Однако эксперимент показывает, что это не так, а разрушение балки начинается в сечениях, расположенных ближе к середине пролета.

К сожалению, нелинейная теория балок так же, как и классическая теория, не дает ответа на эти вопросы. Результаты, получаемые с использованием нелинейной теории (см., например, учебное пособие П.А. Жилина), позволяют лишь получить асимптотические приближения значений усилий и прогибов к точному решению, исходя из предположений об отсутствии жесткости балки (модель гибкой нити) или условия бесконечной жесткости балки.

Теория критических уровней потенциальной энергии деформации, развиваемая авторами, дала возможность на основе вариационного критерия критических уровней энергии получить результат [33], объясняющий положение места разрыва образца, растягиваемого сосредоточенными силами. В то время как согласно классической теории сопротивления материалов, все сечения при осевом растяжении образца равноопасны.

Настоящая статья посвящена развитию методики исследования деформируемых тел на критических уровнях энергии на примере задач изгиба балок, уточнению уравнений состояния изгибаемых систем на основе теории критических уровней внутренней потенциальной энергии деформации (далее энергии деформации) твердых деформируемых тел, позволяющему объяснить некоторые отличия классической теории изгиба балок и результатов экспериментов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Понятие критического состояния систем широко используется в науке и технике. Как правило, достижение критического состояния означает, что параметры системы достигли своих предельных значений, после превышения которых система либо перестает существовать, либо качественно меняет закономерности своего поведения.

Примерами в механике твердого деформируемого тела служат потеря устойчивости первоначальной формы равновесия конструкции, явление резо-

нанса. Вполне вероятно, что потеря прочности конструкцией — также проявление неустойчивости процесса деформирования материала.

Математическая модель указанных видов критического состояния деформируемых твердых тел может быть получена из рассмотрения потенциальной энергии деформации системы без учета внешних воздействий [33]. Пусть внутренняя потенциальная энергия деформации системы представлена инвариантом, описывающим задачу в виде [34, 35]:

$$U = \int_a^b L(x, \xi, \xi') dx, \quad (1)$$

при краевых условиях

$$\xi(a) = d, \xi(b) = g. \quad (2)$$

Набор критических уровней энергии, соответствующий равенству нулю второй вариации функционала, определяется записью в сопряженном виде [36]:

$$\int_a^b \left[ L_{\xi'\xi'} \Phi'^2 + \left( L_{\xi\xi} + \frac{dL_{\xi\xi'}}{dx} \right) \Phi^2 \right] dx \rightarrow \min. \quad (3)$$

при изопериметрическом условии

$$\|\Phi\| = \int_a^b \Phi^2(x) dx = 1, \quad (4)$$

и краевых условиях

$$\Phi(a) = \Phi(b) = 0. \quad (5)$$

Здесь индексы означают дифференцирование по соответствующей переменной;  $\Phi(x)$  — обобщенные усилия, переменная, сопряженная обобщенным перемещением  $\xi(x)$ .

Лагранжиан задачи (3)–(5) имеет вид:

$$L = \lambda_0 \Phi^2 + L_{\xi'\xi'} (\Phi')^2 + \left( L_{\xi\xi} + \frac{dL_{\xi\xi'}}{dx} \right) \Phi^2,$$

и уравнение Эйлера – Лагранжа:

$$\frac{\partial L}{\partial \Phi} - \frac{d}{dx} \frac{\partial L}{\partial \Phi'} = 0.$$

Тогда уравнение Якоби запишется как:

$$2\lambda_0 \Phi + 2\Phi \left( L_{\xi\xi} + \frac{d}{dx} L_{\xi'\xi'} \right) - \frac{d}{dx} (2L_{\xi'\xi'} \Phi') = 0. \quad (6)$$

Введя обозначения, получим:

$$A\Phi'' + B\Phi' + C\Phi = 0,$$

где выражения коэффициентов однородного дифференциального уравнения имеют вид:

$$A = L_{\xi'\xi'}, \quad B = \frac{dL_{\xi'\xi'}}{dx}, \quad C = \lambda_0 + L_{\xi\xi} + \frac{dL_{\xi\xi'}}{dx}. \quad (7)$$

Используя подстановку

$$y(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{\Phi}},$$

приведем уравнение (6) к нормальному виду

$$y'' + \omega(x)y = 0. \quad (8)$$

Здесь

$$\omega(x) = -\frac{C}{A} - \frac{1}{4} \left( \frac{B}{A} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left( \frac{B}{A} \right). \quad (9)$$

Обратим внимание на то, что  $B = A'$ , как следует из уравнения (7).

В задачах (4)–(6) мы получили формулировку условий самонапряжения деформируемой системы исходя из условия стационарности внутренней потенциальной энергии деформации системы. Наличие дискретного спектра определяется величиной  $\omega(x)$  [37]. Спектр однородной задачи (8) дискретен, если:

для  $\omega(x) \leq 0$ ,  $x \geq 0$ ,  $\omega'(x) < 0$ ;

при  $x \rightarrow \infty$ ,  $\omega(x) \rightarrow -\infty$ ;

$\omega''(x)$  сохраняет знак для больших величин  $x$ ;

интеграл  $\int_0^\infty |\omega(x)|^{-\frac{1}{2}} dx$  сходится.

Нетрудно показать, что приведенные выше условия выполняются и для других фазовых переменных задач строительной механики. Сопряженная задача для обобщенных перемещений будет иметь вид:

$$(y^*)'' + \omega^*(x)y^* = 0, \quad \|\xi\| = \int_c^d \xi^2(x) dx = 1, \quad (10)$$

$$\xi(c) = \xi(d) = 0.$$

Знак \* означает переменную, сопряженную  $y(x)$ .

Таким образом, на критических уровнях энергии для всех фазовых переменных справедлива постановка задачи в виде задачи на собственные значения при соответствующих краевых условиях вида и условии нормировки (условии полноты собственных функций задачи).

Чтобы иметь представление о величине и физическом смысле коэффициентов (7) в уравнении (9), рассмотрим лагранжиан (1) потенциальной энергии деформации тела в виде разложения в ряд Тейлора, ограничившись линейной частью ряда:

$$L(x, \xi, \xi') = \frac{\partial L_0}{\partial x} x + \frac{\partial L_0}{\partial \xi} \xi + \frac{\partial L_0}{\partial \xi'} \xi' +$$

$$+ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial L_0}{\partial x^2} x^2 + \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi^2} \xi^2 + \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2} \xi'^2 + \right.$$

$$\left. + 2 \frac{\partial L_0}{\partial x \partial \xi} x \xi + 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial x \partial \xi'} x \xi' + 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi \partial \xi'} \xi \xi' \right).$$

Тогда коэффициенты уравнения (7) будут иметь вид:

$$A = L_{\xi'\xi'} = 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2}, \quad B = \frac{d}{dx} L_{\xi'\xi'} = 2 \frac{d}{dx} \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi' \partial \xi'},$$

$$C = \lambda_0 + 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2} + \frac{d}{dx} 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi' \partial \xi'}.$$

В квазистационарных задачах лагранжиан имеет смысл потенциальной энергии деформации в точке. Тогда можно записать для начальной точки кривой состояния системы:

$$\frac{\partial L}{\partial \xi} = \Phi, \quad \frac{\partial L}{\partial \xi'} = \Phi', \quad A = 2 \frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2} = 2 \left. \frac{\partial \Phi'}{\partial \xi'} \right|_0;$$

$$C = \lambda_0 + \frac{\partial^2 L}{\partial \xi'^2} = \lambda_0 + \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right|_0. \quad (11)$$

Постоянная величина  $A$  имеет смысл скорости изменения жесткости в точке элемента конструкции. Она связывает скорости изменения обобщенных перемещений и скорости изменения обобщенных усилий по координате в рассматриваемой точке на определенном этапе деформирования.

В классической механике твердого деформируемого тела изменение скоростей обобщенных усилий и обобщенных перемещений по пространственной координате считают пренебрежимо малым, что связано с гипотезой о малом изменении жесткости по координате. Поэтому постоянную величину можно считать равной жесткости системы в начальный момент деформирования.

Влияние изменения жесткости системы по координате наиболее глубоко изучено в теории анизотропных тел. При этой постановке задач в большинстве случаев основываются на гипотезе «размывания» жесткости по объему и, таким образом, сводят задачу к изотропной. Другие виды задач — это задачи тел с изменяющейся геометрией поперечного сечения вдоль координаты или задачи с изменением механических характеристик тела вдоль координаты (включая задачи о коррозии материала и появлении разного рода неоднородностей в материале). Мы хотим обратить внимание на тот факт, что скорость изменения жесткости в точке тела влияет на поле деформаций и в изотропных телах, поэтому должна учитываться в постановке и решении задач о деформировании изотропных конструкций. Подтверждением этому утверждению служит использование стандартизованных размеров образцов, применяемых в лабораторных испытаниях, а также баз тензодатчиков (резисторных) и тензометров. Иначе невозможно обеспечить повторяемость и достоверность сличительных испытаний.

Смешанная производная в выражениях  $B$  и  $C$  (6) равна нулю на экстремалиях. Второе слагаемое в коэффициенте  $C$  имеет смысл упругой жесткости эле-

мента конструкции на рассматриваемом уровне деформирования, что позволяет сделать вывод (ввиду произвольности множителя Лагранжа  $\lambda$ ), что коэффициент равен жесткости системы в начальный момент деформирования:

$$\omega = \frac{\lambda + K_0}{K_0},$$

где  $K_0$  — начальная жесткость системы.

В динамических задачах, если выражение (11) записать в обобщенных перемещениях, после разделения переменных, имеем:

$$\frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2} = m(x),$$

где  $m(x)$  — погонная масса элемента конструкции;

$$\frac{\partial^2 L_0}{\partial \xi'^2} = k(x),$$

где  $k(x)$  — погонная жесткость элемента конструкции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покажем реализацию полученных результатов на простых задачах сопротивления материалов, где можно будет увидеть причины расхождения классической теории с экспериментальными результатами.

*Чистый изгиб простой балки.* Для решения задачи плоского чистого изгиба балки (см. рис. 1) мы имеем две группы операторов. Первая позволяет определить функции влияния нагрузки на обобщенные усилия и перемещения:

$$L_1(w) = (EJw'')'' = 0, \quad (12)$$

при краевых условиях

$$EJw''(0) = -M_{cr}, \quad EJw''(l) = -M_{cr}, \quad (13)$$

где  $EJ$  — жесткость балки;  $w$  — вертикальные перемещения точек оси изогнутой балки;  $M_{cr}$  — критическая (предельная) величина моментов, приложенных по концам балки в предположении ее работы в упругой стадии.

Несложно видеть, что это — уравнения классической теории изгиба балок, полученные в предположении об ее недеформируемой схеме. Другими словами, результат решения данных уравнений — это эквивалентное заданной нагрузке воздействие на изгибаемую балку в виде перемещений или внутренних усилий (шаблон, имитирующий нагрузку).

Решение уравнения (12) имеет вид:

$$w_0 = C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3.$$

Краевые условия можно записать как:

$$w_0(0) = 0; \quad w_0(l) = 0;$$

$$w_0''(0) = M_{cr}/EJ; \quad w_0''(l) = -M_{cr}/EJ.$$

Подставив функцию прогибов в краевые условия, получаем значения постоянных величин:

$$C_1 = 0; C_4 = 0; C_2 = M_{cr}l/2EJ; C_3 = -M_{cr}/2EJ.$$

Функция влияния нагрузки на прогибы недеформируемой балки приобретает вид

$$w_0 = xM_{cr}l/2EJ - x^2M_{cr}/2EJ. \quad (14)$$

Эпюра прогибов  $w_0$  представлена на рис. 1. Эпюра моментов  $M_0$  постоянна вдоль пролета балки, что соответствует результатам классической теории.

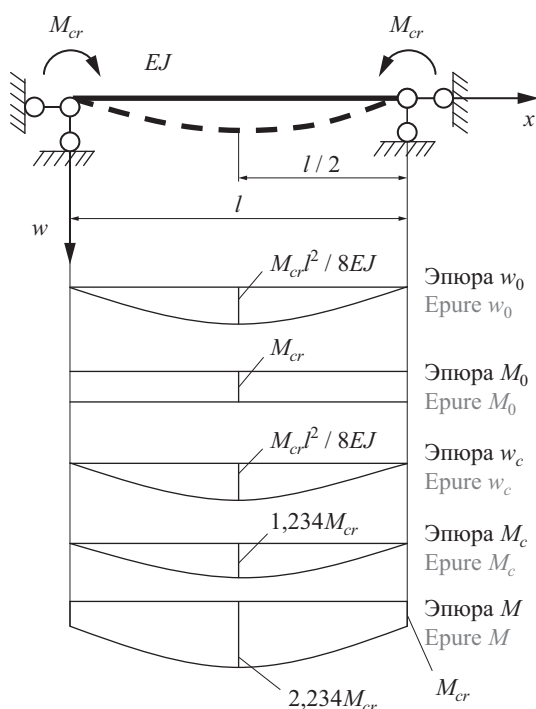


Рис. 1. Расчетная схема и эпюры прогибов и критических моментов

Fig. 1. Design scheme and diagrams of deflections and critical moments

Результат решения задачи — найдены эквивалентные внутренние усилия, уравнивающие внешнюю нагрузку на недеформируемую балку.

Вторая группа уравнений представляет собой критерий критических уровней энергии для поставленной задачи [33]. Вариационная постановка задачи изгиба имеет вид (10), где первое выражение — уравнение оси изогнутой балки, которая находится в состоянии самонапряжения как при воздействии малых вариаций внешних воздействий, так и в момент нагружения заданной величиной нагрузки. Уравнение однородное, поскольку внешняя нагрузка уравновешена внутренними усилиями, определяемыми в соответствии с задачей (12), (13). В роли обобщенных перемещений здесь выступают прогибы балки

$$L_2(w) = w'' + kw = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения (14) хорошо известно [38], а в отдельных случаях для собственных значений

и собственных функций существуют явные решения для некоторых типов граничных условий.

Например, в случае свободно опертой балки с граничными условиями  $w(0) = w(l) = 0$  имеем набор собственных значений:

$$\lambda_n = k_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

Нормированные собственные функции имеют вид:

$$w_n(x) = \sin(x\sqrt{k_n}). \quad (17)$$

С точки зрения критических уровней энергии, собственные моды изгиба балки показывают, что какой бы ни была нагрузка, на критических уровнях энергии форма оси изогнутой балки описывается только собственными модами вида (17). По сути, это есть моды деформирования балки, изменяющиеся подобным образом от одного критического уровня деформаций к другому, соответствующие состояниям самонапряжения на критических уровнях энергии.

С другой стороны, уравнение прогибов самонапряжения (17) можно представить нормированным на амплитудное значение для первого критического уровня как:

$$\frac{w_1(x)}{w_A} = \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right). \quad (18)$$

Выразим амплитудное значение прогиба через предельный изгибающий момент в середине балки, который определяется как в классической теории (10):

$$w_A = \frac{M_{cr} l^2}{8EJ}. \quad (19)$$

Тогда уравнение прогибов самонапряжения для первой моды изгиба  $n = 1$  имеет вид:

$$w_{1c}(x) = \frac{M_{cr} l^2}{8EJ} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right). \quad (20)$$

Уравнение распределения изгибающих моментов самонапряжения балки вдоль ее пролета будет иметь вид:

$$\begin{aligned} M(x) &= EJw_{1c}''(x) = \frac{M_{cr} \pi^2}{8} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) = \\ &= 1,234 M_{cr} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right). \end{aligned} \quad (21)$$

Эпюра моментов самонапряжения показана на рис. 1. Величина момента самонапряжения превышает величину момента в опасном сечении, вычисленного для недеформируемой балки приблизительно на 23 %. Указанная разница идет в запас прочности, поскольку при одинаковой величине предельного значения момента в опасном сечении

следует увеличить изгибающие моменты, нагружающие балку, до величины, приведенной в выражении (21).

Эпюра моментов самонапряжения показывает, что распределение усилий в балке не является постоянной величиной вдоль пролета, а имеет максимальное значение посередине пролета, что соответствует экспериментальным данным, а также теории стержней большой гибкости [2].

**Плоский поперечный изгиб.** Пусть поперечная сосредоточенная внешняя нагрузка на балку расположена на расстоянии  $l/3$  от левой опоры балки.

В случае прямого поперечного изгиба балки, согласно классической теории сопротивления материалов, опасное сечение рассчитывается по эпюре моментов  $M_f$  и находится под внешней сосредоточенной силой. Если сила приложена не в середине балки (как в нашем случае), то сечение, в котором начинается разрушение, наблюдаемое в эксперименте, не совпадает с положением опасного сечения.

Начнем с определения функции распределения прогибов для недеформируемой схемы балки. На рис. 2 показаны эпюры моментов  $M_f$  и прогибов  $w_0$  для случая действия сосредоточенной силы, определенные для недеформируемой схемы.

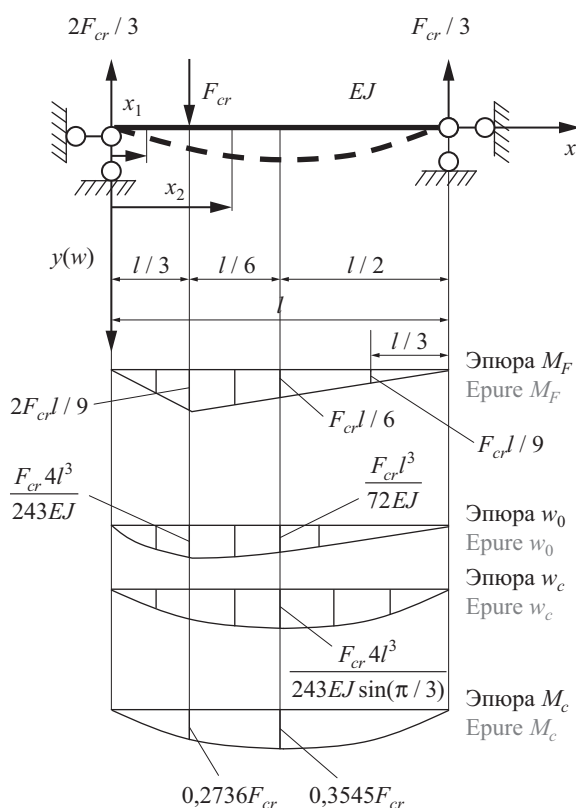


Рис. 2. Изгиб балки, сосредоточенной силой  
Fig. 2. Bending of a beam by concentrated force

Для построения функции прогибов балки, рассчитываемой по недеформируемой схеме, используем решение уравнения оси изогнутой балки. Вид

функции влияния на прогибы балки заданной нагрузки устанавливается по зависимости между моментами и прогибами балки типа (12):

$$w(x) = \iint \frac{M(x)}{EJ} dx dx. \quad (22)$$

Выражение (22) может быть представлено в более удобном для расчетов виде:

$$\varphi = \varphi_0 - \int_0^{x_i} \frac{M dx}{EJ}, \quad w = w_0 + \int_0^{x_i} \varphi dx. \quad (23)$$

Здесь интегрирование по координате ведется по участкам, а  $x_i$  — текущая координата на участке. Несложно видеть, что функция прогибов недеформируемой балки при воздействии сосредоточенной нагрузки будет кубической параболой. На эпюре прогибов показаны прогибы под силой и в середине пролета балки.

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq a, \quad w_{01} &= \frac{Fa^2b^2}{6EJ} \left( 2\frac{x}{a} + \frac{x}{b} - \frac{x^3}{a^2b} \right); \\ a \leq x \leq l, \quad w_{02} &= \frac{Fa^2b^2}{6EJ} \left( 2\frac{l-x}{b} + \frac{l-x}{a} - \frac{(l-x)^3}{ab^2} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Заметим, что в классической теории изгиба балок имеют место и другие способы представления функции прогибов простой балки: функции Эрмита, балочные функции и т.д. Важно, что все они приведут к одинаковым значениям прогибов в интересующих нас точках, показанных на эпюре  $w_0$ .

Для случая самонапряжения балки (16), (17) получаем величину прогиба в середине, исходя из того, что прогибы в месте расположения силы должны совпадать для двух рассматриваемых случаев: недеформируемой балки и самонапряжения:

$$w_c(x) = \frac{F_{cr} 4l^3}{243EJ \sin(\pi/3)} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right). \quad (25)$$

Тогда уравнение моментов для состояния самонапряжения балки, изогнутой силой, примет вид:

$$M_c(x) = \frac{F_{cr} 4l\pi^2}{243 \sin(\pi/3)} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right). \quad (26)$$

Величина момента под силой:

$$M_c(x) = \frac{F_{cr} 4l\pi^2}{243} + \frac{F_{cr} l}{9} = 0,2736F_{cr} l. \quad (27)$$

Величина момента в середине пролета балки:

$$M_c(x) = \frac{F_{cr} 4l\pi^2}{243 \sin(\pi/3)} + \frac{F_{cr} l}{6} = 0,3545F_{cr} l. \quad (28)$$

Мы получили, что опасное сечение в середине пролета балки, как и в эксперименте, и в монографии [2]. Итоговая эпюра отражает два состояния балки:

равновесие внешней нагрузки и внутренних усилий, и состояние самонапряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная методика исследования систем с распределенными параметрами на критических уровнях энергии дает возможность получить уравнение оси изогнутой балки, находящейся в условиях самонапряжения на критических уровнях энергии. Математическая модель в виде задачи на собственные значения позволяет выбрать функции распределения моментов вдоль оси балки в виде собственных функций однородной задачи типа (8), (15), а собственные значения — найти прогибы в характерных точках пролета.

Полученные результаты показывают, что наибольшие величины моментов (опасные сечения) находятся в середине пролета балки, что подтверждается экспериментами и теорией гибких стержней [2].

Следует заметить, что в подавляющем большинстве задач сопротивления материалов и строительной механики целью является не построение эпюры с максимальной точностью (выбор функции, аппроксимирующей уравнение оси изогнутой балки), а определение расположения опасных сечений и максимальные значения внутренних усилий (деформаций) в них. Практикующие расчетчики, опираясь на опыт, принимают положение опасного сечения в середине пролета, объясняя, что разница моментов в пролете невелика. Правоту их утверждений легко проверить, построив линии влияния моментов в середине пролета балки, и, как в выбранном выше примере, на расстоянии трети пролета от левой опоры. Любые сочетания нагрузок, включая статические подвижные, дадут максимальное (опасное) значение момента в сечении, расположенном в середине пролета. Проведенное исследование подтверждает их правоту, как и утверждение Леонардо, основанное на эксперименте.

Сравнение результатов, полученных в работе [2] по теории стержней большой гибкости, с линейной теорией сопротивления материалов подробно выполнено Е.П. Поповым.

В теории стержней большой гибкости получено точное решение уравнения кривизны балки

$$l^2 \frac{d^2 \zeta}{ds^2} = -\beta^2 \sin \zeta, \quad \zeta = \vartheta + \delta, \quad \beta = Fl^2/EJ,$$

вытекающее из математического выражения кривизны отрезка кривой

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w''}{(\sqrt{1+w'^2})^3},$$

где  $l$  — длина пролета балки;  $s$  — отрезок криволинейного участка балки;  $\vartheta$  — угол наклона между

касательной к оси балки и начальным расположением оси;  $\delta$  — угол наклона силы к оси балки;  $\rho$  — радиус кривизны балки.

Для сравнения выбиралось решение приближенного уравнения продольно-поперечного изгиба балок, полученного по линейной теории

$$EJw'' + Nw = M(x). \quad (29)$$

Чтобы не повторять выполненный анализ расхождения результатов, мы отсылаем читателя к первоисточнику [2], отметив, что разница в определении прогибов достигает 32 %, а в определении напряжений около 15 %. Причем полученное расхождение результатов относится в запас прочности проектов, рассчитанных по линейной теории.

Несложно видеть аналогию уравнений (29) и (15), исходящих из разных предпосылок и описывающих разные физические явления. Однако соответствующий задаче (10), (15) выбор нормировочных множителей для собственных функций задачи о самонапряжении балки при изгибе позволяет получать результаты, хорошо коррелирующие с известными данными.

В решенных нами задачах нормировочный множитель выбирался по уравнениям (19) и (25), соответственно, в предположении малости прогибов, когда, как и в линейной теории сопротивления материалов, продольными усилиями в балке можно пренебречь. Даже в этом случае момент самонапряжения в выражении (28) для сечения, расположенного

$$\text{ного в середине пролета балки } M_c^{cr} = \frac{F_{cr} 4l^2}{243 \sin(\pi/3)} =$$

$$= 0,1876 F_{cr} l, \text{ отличается от опасного момента, найденного по классической теории в сечении, расположенном на расстоянии трети пролета от левой опоры}$$

$$M_F^{cr} = \frac{F_{cr} l}{9} = 0,1111 F_{cr} l, \text{ почти в 1,69 раз. Это говорит}$$

о том, что для достижения предельной величины момента самонапряжения в сечении, расположенном в трети пролета балки от левой опоры, такой же, как предельная величина момента в середине пролета, действующую нагрузку следует увеличить в указанное количество раз. Таким образом, имеется значительный запас прочности у конструкции, спроектированной по классической теории.

Результаты исследования можно кратко сформулировать в следующем виде:

1. Получены уравнения состояния системы с распределенными параметрами на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации, которые описывают состояние самонапряжения (самоуравновешенности) системы.

2. На их основе представлены математические модели задач чистого изгиба и прямого поперечного изгиба балки сосредоточенной силой.

3. Решение задач изгиба балок, находящихся на критическом уровне энергии в состоянии самонапряжения, хорошо согласуется с известными клас-

сическими результатами сопротивления материалов и теорией гибких стержней Е.П. Попова.

4. Получено, что классическая теория сопротивления материалов дает запас прочности по изгибающим моментам в задаче чистого изгиба в размере 23 %. В задаче поперечного изгиба силой, расположенной в одной трети пролета от одной из опор, запас прочности по моментам составляет 59 %.

Дальнейшие уточнения могут быть получены для стадии изгиба, когда необходимо учитывать влияние продольных усилий, возникающих в балке, а также влияние сдвиговых деформаций. Для этого уточняется нормировочный множитель  $k$  в уравнениях (15).

Предлагаемая методика может быть распространена на двумерные и трехмерные объекты строительной механики с целью определения опасных сечений и точек конструкции, в которых рационально выбирать характерные точки для использования в практике проектирования, а также построения матричных алгоритмов расчета конструкций и метода конечных элементов.

С практической точки зрения положение характерных сечений может применяться при мониторинге строительных конструкций ответственных зданий и сооружений, для оценки состояния несущих конструкций в процессе эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин Н.Н. Кто есть кто в сопротивлении материалов / под ред. В.Л. Данилова. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 244 с.
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 294 с.
3. Павилайнен Г.П. Математическая модель задачи изгиба пластически анизотропной балки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2015. Т. 2. № 4. С. 633–638.
4. Wang J., Ma R., Wen J. S-shaped connected component for nonlinear fourth-order problem of elastic beam equation // Journal of Function Spaces. 2017. Vol. 2017. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2017/1069491
5. He C., Wu X., Wang T., He H. Geometrically nonlinear analysis for elastic beam using point interpolation meshless method // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2019/9065365
6. Wang D., Zhang J., Guo J., Fan R. A closed-form nonlinear model for spatial Timoshenko beam flexure hinge with circular cross-section // Chinese Journal of Aeronautics. 2019. Vol. 32. Issue 11. Pp. 2526–2537. DOI: 10.1016/j.cja.2019.01.025
7. Li X., Huang W., Jawed M.K. A discrete differential geometry-based approach to numerical simulation of Timoshenko beam // Extreme Mechanics Letters. 2020. Vol. 35. P. 100622. DOI: 10.1016/j.eml.2019.100622
8. Alavi S.E., Sadighi M., Pazhooh M.D., Ganghoffer J.-F. Development of size-dependent consistent couple stress theory of Timoshenko beams // Applied Mathematical Modelling. 2020. Vol. 79. Pp. 685–712. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.058
9. He W., Wei Y. Dynamic response of double elastic cantilever beam attributed to variable uniformly distributed load // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–17. DOI: 10.1155/2019/2657271
10. Zhao X.-N., Yang X.-D. Elastic wave properties of an adaptive electromechanical metamaterial beam // Shock and Vibration. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/8834856
11. Wang D., Zhang J., Wang Y., Zhang S. Attractor of beam equation with structural damping under nonlinear boundary conditions // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2015/857920
12. Guan Y., Yuan H., Ge Z., Huang Y., Li S., Sun R. Flexural properties of ECC-concrete composite beam // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2018/3138759
13. He Y., Jin X. Vibration properties of a steel-PMMA composite beam // Shock and Vibration. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2015/639164
14. Hao M., Chen A.-J. Dropping impact characteristics analysis of a cubic nonlinear packaging system with a cantilever beam type elastic critical component with concentrated tip mass // Shock and Vibration. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2015/602984
15. Lai Z., Jiang L., Zhou W., Chai X. Improved finite beam element method to analyze the natural vibration of steel-concrete composite truss beam // Shock and Vibration. 2017. Vol. 2017. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2017/5323246
16. Hui Y., De Pietro G., Giunta G., Belouettar S., Hu H., Carrera E. et al. Geometrically nonlinear analysis of beam structures via hierarchical one-dimensional finite elements // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–22. DOI: 10.1155/2018/4821385
17. Machalová J., Netuka H. Solution of contact problems for nonlinear Gao beam and obstacle // Journal of Applied Mathematics. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2015/420649
18. She H., Li C., Tang Q., Wen B. Nonlinear vibration analysis of a rotating disk-beam system subjected to dry friction // Shock and Vibration. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2020/7604174
19. Li J., Zhu Y., Ye S., Ma X. Internal force analysis and field test of lattice beam based on winkler theory for elastic foundation beam // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2019/5130654

20. *Esen I.* Dynamic response of functional graded Timoshenko beams in a thermal environment subjected to an accelerating load // *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2019. Vol. 78. P. 103841. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103841
21. *Bai R., Hajjar J.F., Liu S.-W., Chan S.-L.* A mixed-field Timoshenko beam-column element for direct analysis of tapered I-sections members // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 172. P. 106157. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106157
22. *Zhao X., Chen B., Li Y.H., Zhu W.D., Nkiegaing F.J., Shao Y.B.* Forced vibration analysis of Timoshenko double-beam system under compressive axial load by means of Green's functions // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 464. Pp. 115001. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.115001
23. *Fu P., Yuan J., Zhang X., Kang G., Wang P., Kan Q.* Forced vibration analysis of blade after selective laser shock processing based on Timoshenko's beam theory // *Composite Structures*. 2020. Vol. 243. P. 112249. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112249
24. *Fan W., Zhu W.D., Zhu H.* Dynamic analysis of a rotating planar Timoshenko beam using an accurate global spatial discretization method // *Journal of Sound and Vibration*. 2019. Vol. 457. Pp. 261–279. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.05.003
25. *Yanga X.-D., Wang S.-W., Zhanga W., Yangb T.-Z., Lim C.W.* Model formulation and modal analysis of a rotating elastic uniform Timoshenko beam with setting angle // *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2018. Vol. 72. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2018.05.014
26. *Li X.Y., Wang X.H., Chen Y.Y., Tan Y., Cao H.J.* Bending, buckling and free vibration of an axially loaded Timoshenko beam with transition parameter: Direction of axial force // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 176. P. 105545. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105545
27. *Qin H., Yan Y., Liu H., Liu J., Zhang Y.-W., Liu Y.* Modified Timoshenko beam model for bending behaviors of layered materials and structures // *Extreme Mechanics Letters*. 2020. Vol. 39. P. 100799. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100799
28. *Chowdhury S.R., Reddy J.N.* Geometrically exact micropolar Timoshenko beam and its application in modelling sandwich beams made of architected lattice core // *Composite Structures*. 2019. Vol. 226. P. 111228. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111228
29. *Huang S., Qiao P.* Nonlinear stability analysis of thin-walled I-section laminated composite curved beams with elastic end restraints // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111336. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111336
30. *Joglekar D.M.* Analysis of nonlinear frequency mixing in Timoshenko beams with a breathing crack using wavelet spectral finite element method // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 488. P. 115532. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115532
31. *Deng H., Chen K., Cheng W., Zhao S.* Vibration and buckling analysis of double-functionally graded Timoshenko beam system on Winkler-Pasternak elastic foundation // *Composite Structures*. 2017. Vol. 160. Pp. 152–168. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.027
32. *Esen I.* Dynamic response of a functionally graded Timoshenko beam on two-parameter elastic foundations due to a variable velocity moving mass // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 153–154. Pp. 21–35. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.01.033
33. *Ступишин Л.Ю.* Вариационный критерий критических уровней внутренней энергии деформируемого тела // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 8. С. 21–22.
34. *Арнольд В.И.* Математические методы классической механики. М. : Наука, 1974. 432 с.
35. *Голдстейн Г.* Классическая механика. М. : Наука, 1975. 415 с.
36. *Михлин С.Г.* Вариационные методы в математической физике. М. : Наука, 1970. 512 с.
37. *Костюченко А.Г., Саргсян И.С.* Распределение собственных значений (самосопряженные обыкновенные дифференциальные операторы). М. : Наука, 1979. 400 с.
38. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М. : Наука, 1971. 576 с.

Поступила в редакцию 5 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 13 марта 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Леонид Юлианович Ступишин** — кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; StupishinLyu@mgsu.ru;

**Мария Леонидовна Мошкевич** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью, горного дела; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; РИНЦ ID: 616600; mmoshkevich@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Malinin N.N. *Who's Who in the Strength of Materials*. Moscow, MGТУ N.E. Bauman's publishing house, 2000; 248. (rus.).
2. Popov E.P. *Theory and calculation of flexible elastic rods*. Moscow, Nauka, 1986; 294. (rus.).
3. Pavilaynen G.P. Mathematical model for the bending of plastically anisotropic beams. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2015; 2(4):633-638. (rus.).
4. Wang J., Ma R., Wen J. S-shaped connected component for nonlinear fourth-order problem of elastic beam equation. *Journal of Function Spaces*. 2017; 2017:1-8. DOI: 10.1155/2017/1069491
5. He C., Wu X., Wang T., He H. Geometrically nonlinear analysis for elastic beam using point interpolation meshless method. *Shock and Vibration*. 2019; 2019:1-10. DOI: 10.1155/2019/9065365
6. Wang D., Zhang J., Guo J., Fan R. A closed-form nonlinear model for spatial Timoshenko beam flexure hinge with circular cross-section. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019; 32(11):2526-2537. DOI: 10.1016/j.cja.2019.01.025
7. Li X., Huang W., Jawed M.K. A discrete differential geometry-based approach to numerical simulation of Timoshenko beam. *Extreme Mechanics Letters*. 2020; 35:100622. DOI: 10.1016/j.eml.2019.100622
8. Alavi S.E., Sadighi M., Pazhooh M.D., Ganghoffer J.-F. Development of size-dependent consistent couple stress theory of Timoshenko beams. *Applied Mathematical Modelling*. 2020; 79:685-712. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.058
9. He W., Wei Y. Dynamic response of double elastic cantilever beam attributed to variable uniformly distributed load. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019; 2019:1-17. DOI: 10.1155/2019/2657271
10. Zhao X.-N., Yang X.-D. Elastic wave properties of an adaptive electromechanical metamaterial beam. *Shock and Vibration*. 2020; 2020:1-14. DOI: 10.1155/2020/8834856
11. Wang D., Zhang J., Wang Y., Zhang S. Attractor of beam equation with structural damping under nonlinear boundary conditions. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015; 2015:1-10. DOI: 10.1155/2015/857920
12. Guan Y., Yuan H., Ge Z., Huang Y., Li S., Sun R. Flexural properties of ECC-concrete composite beam. *Advances in Civil Engineering*. 2018; 2018:1-7. DOI: 10.1155/2018/3138759
13. He Y., Jin X. Vibration properties of a steel-PMMA composite beam. *Shock and Vibration*. 2015; 2015:1-7. DOI: 10.1155/2015/639164
14. Hao M., Chen A.-J. Dropping impact characteristics analysis of a cubic nonlinear packaging system with a cantilever beam type elastic critical component with concentrated tip mass. *Shock and Vibration*. 2015; 2015:1-10. DOI: 10.1155/2015/602984
15. Lai Z., Jiang L., Zhou W., Chai X. Improved finite beam element method to analyze the natural vibration of steel-concrete composite truss beam. *Shock and Vibration*. 2017; 2017:1-12. DOI: 10.1155/2017/5323246
16. Hui Y., De Pietro G., Giunta G., Belouettar S., Hu H., Carrera E. et al. Geometrically Nonlinear Analysis of Beam Structures via Hierarchical One-Dimensional Finite Elements. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018; 2018:1-22. DOI: 10.1155/2018/4821385
17. Machalová J., Netuka H. Solution of contact problems for nonlinear gao beam and obstacle. *Journal of Applied Mathematics*. 2015; 2015:1-12. DOI: 10.1155/2015/420649
18. She H., Li C., Tang Q., Wen B. Nonlinear vibration analysis of a rotating disk-beam system subjected to dry friction. *Shock and Vibration*. 2020; 2020:1-19. DOI: 10.1155/2020/7604174
19. Li J., Zhu Y., Ye S., Ma X. Internal force analysis and field test of lattice beam based on Winkler theory for elastic foundation beam. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019; 2019:1-13. DOI: 10.1155/2019/5130654
20. Esen I. Dynamic response of functional graded Timoshenko beams in a thermal environment subjected to an accelerating load. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2019; 78:103841. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103841
21. Bai R., Hajjar J.F., Liu S.-W., Chan S.-L. A mixed-field Timoshenko beam-column element for direct analysis of tapered I-sections members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 172:106157. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106157
22. Zhao X., Chen B., Li Y.H., Zhu W.D., Nkiegaing F.J., Shao Y.B. Forced vibration analysis of Timoshenko double-beam system under compressive axial load by means of Green's functions. *Journal of Sound and Vibration*. 2020; 464:115001. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.115001
23. Fu P., Yuan J., Zhang X., Kang G., Wang P., Kan Q. Forced vibration analysis of blade after selective laser shock processing based on Timoshenko's beam theory. *Composite Structures*. 2020; 243:112249. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112249
24. Fan W., Zhu W.D., Zhu H. Dynamic analysis of a rotating planar Timoshenko beam using an accurate global spatial discretization method. *Journal of Sound and Vibration*. 2019; 457:261-279. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.05.003
25. Yanga X.-D., Wanga S.-W., Zhanga W., Yangb T.-Z., Lim C.W. Model formulation and modal analysis of a rotating elastic uniform Timoshenko beam with setting angle. *European Journal of Mechanics —*

*A/Solids*. 2018; 72:209-222. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2018.05.014

26. Li X.Y., Wang X.H., Chen Y.Y., Tan Y., Cao H.J. Bending, buckling and free vibration of an axially loaded Timoshenko beam with transition parameter: Direction of axial force. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020; 176:105545. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105545

27. Qin H., Yan Y., Liu H., Liu J., Zhang Y.-W., Liu Y. Modified Timoshenko beam model for bending behaviors of layered materials and structures. *Extreme Mechanics Letters*. 2020; 39:100799. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100799

28. Chowdhury S.R., Reddy J.N. Geometrically exact micropolar Timoshenko beam and its application in modelling sandwich beams made of architected lattice core. *Composite Structures*. 2019; 226:111228. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111228

29. Huang S., Qiao P. Nonlinear stability analysis of thin-walled I-section laminated composite curved beams with elastic end restraints. *Engineering Structures*. 2021; 226:111336. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111336

30. Joglekar D.M. Analysis of nonlinear frequency mixing in Timoshenko beams with a breathing crack using wavelet spectral finite element method.

*Journal of Sound and Vibration*. 2020; 488:115532. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115532

31. Deng H., Chen K., Cheng W., Zhao S. Vibration and buckling analysis of double-functionally graded Timoshenko beam system on Winkler-Pasternak elastic foundation. *Composite Structures*. 2017; 160:152-168. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.027

32. Esen I. Dynamic response of a functionally graded Timoshenko beam on two-parameter elastic foundations due to a variable velocity moving mass. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019; 153-154:21-35. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.01.033

33. Stupishin L.Yu. Variation criterion of critical levels of deformable body internal energy. *Industrial and Civil Engineering*. 2011; 8:21-22. (rus.).

34. Arnold V.I. *Mathematical methods of classical mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1974; 432. (rus.).

35. Goldsteyn G. *Classical mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1975; 415. (rus.).

36. Mikhlin S.G. *Variational methods in mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 1970; 512. (rus.).

37. Kostuchenko A.G., Sargsyan I.S. *Distribution of eigenvalues (self-adjoint ordinary differential operators)*. Moscow, Nauka, 1979; 400. (rus.).

38. Kamke E. *Ordinary Differential Equations Handbook*. Moscow, Nauka Publ., 1971; 576. (rus.).

Received February 5, 2021.

Adopted in revised form on March 12, 2021.

Approved for publication on March 13, 2021.

**B I O N O T E S:** **Leonid Yu. Stupishin** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; StupishinLy@mgau.ru;

**Mariya L. Moshkevich** — Candidate of economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Expertise and Real Estate Management, Mining; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 Let Oktyabrya st., Kursk, Russian Federation; ID RISC: 616600; mmoshkevich@yandex.ru.

## Упрощенный подход к моделированию уплотнителя для прочностного расчета оконных конструкций

И.С. Аксенов, А.П. Константинов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является изучение влияния деформированного состояния оконных конструкций на их эксплуатационные характеристики. Данная задача сопряжена с вопросами статической работы элементов окна при совместном действии ветровых и температурных нагрузок. Для анализа статической работы окна предлагается применять возможности современных программ конечно-элементного моделирования. Одна из возникающих при этом проблем — моделирование эластичного уплотнителя.

**Материалы и методы.** Моделирование и расчет механической работы оконного уплотнителя в прямой постановке требуют значительных временных затрат. Предлагается упрощенный способ учета механической работы уплотнителя в конструкции окна при ее конечно-элементном моделировании в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для этого получена зависимость силы реакции отпора уплотнителя от степени его обжатия, эта зависимость была использована для создания специального граничного условия, которое имитирует передачу усилия с одного элемента окна на другой через уплотнитель.

**Результаты.** Проведены сравнительные расчеты с одинаковыми нагрузками и условиями закрепления: в первом случае уплотнитель моделировался в полном соответствии с его фактической геометрией, во втором он заменен специальным граничным условием. Результаты расчетов показали, что принятый метод упрощенного моделирования механической работы уплотнителя позволяет получить решение с точностью до 1,26 %, соответствующее решению, полученному при полноценном расчете напряженно-деформированного состояния уплотнителя, но за меньшее время.

**Выводы.** Развитие научных основ проектирования оконных конструкций должно опираться на современные методы исследования, в том числе компьютерное моделирование. Создание компьютерной модели статической работы окна даст возможность детально рассмотреть ее деформированное состояние и эксплуатационные характеристики при различных граничных условиях. Предлагаемый метод моделирования механической работы оконного уплотнителя будет полезен при решении данной задачи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** окно, конечно-элементное моделирование, оконный уплотнитель, эластомеры, температурная нагрузка, ветровая нагрузка, COMSOL Multiphysics

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Аксенов И.С., Константинов А.П. Упрощенный подход к моделированию уплотнителя для прочностного расчета оконных конструкций // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 317–330. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.317-330

## A simplified approach to the window gasket modeling for window strength calculation

Ivan S. Aksenov, Aleksandr P. Konstantinov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The study of the influence of window deformations on their performance characteristics is an urgent task. This problem is related to the issues of window elements static operation under the combined action of wind and temperature loads. It is proposed to use the capabilities of modern finite element modeling programs to analyze the window static operation. One of the problems is the modeling of an elastic window gaskets.

**Materials and methods.** Computation of a gasket structural behavior in the direct formulation is associated with significant computational costs. In this article it is proposed a simplified method which allows taking into account the gasket mechanical work when creating window fine element model in the COMSOL Multiphysics software. For this purpose, the dependence of the gasket reaction force on the degree of its compression was obtained; this dependence was used to create a special boundary condition that imitates the force transfer from one window element to another through the gasket.

**Results.** Two test computations were carried out with the same loads and grip conditions: in one, the gasket was modeled directly, in the other, it was replaced by the boundary condition described above. The results showed good agreement between the computations, moreover the second one needed much less time.

**Conclusions.** Scientific foundations of window design should be based on modern research methods including computer modeling. Creating a computer model of the window static operation will allow us to consider in detail its deformed state and operational characteristics under various boundary conditions. The method proposed in this article for modeling the gasket structural behavior will be useful in achieving this aim.

**KEYWORDS:** window, finite element modeling, window gasket, elastomers, temperature load, wind load, COMSOL Multiphysics

**FOR CITATION:** Aksekov I.S., Konstantinov A.P. A simplified approach to the window gasket modeling for window strength calculation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):317-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.317-330 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В современных научных исследованиях активно применяется метод компьютерного моделирования, который благодаря постоянному совершенствованию вычислительной техники и программного обеспечения становится столь же мощным инструментом анализа, как и натурный эксперимент. В настоящий момент актуальной является проблема разработки численных методов расчета оконных конструкций, которые можно использовать наряду с дорогостоящими лабораторными испытаниями. Одна из наиболее востребованных тематик исследований для климатических условий РФ и стран Северной Европы — влияние деформаций оконных конструкций на их эксплуатационные характеристики (сопротивление теплопередаче, воздухопроницаемость, звукоизоляцию) [1–4]. Данная проблема связана с необходимостью изучения вопроса статической работы элементов оконных конструкций при действии ветровых и температурных нагрузок [5].

Окно — многокомпонентная конструкция со сложными условиями сопряжения элементов между собой. Для того чтобы исследовать ее статическую работу, предлагается создать в программе COMSOL Multiphysics ее полноценную конечно-элементную 3D-модель. Одной из возникающих при этом трудностей служит моделирование эластичного уплотнителя, расположенного между рамой (импостом) и створкой, а также между створкой и стеклопакетом (рис. 1).

Уплотнитель играет большую роль в распределении усилий внутри оконной конструкции, в том числе передает горизонтальную нагрузку со стеклопакета на створку, а также со створки на раму и импост, обеспечивает обжатие створки при запирании окна, формирует защемление стеклопакета по периметру створки.

Уплотнитель изготавливается из эластичного материала и работает в сложных условиях, испытывая значительные деформации. Его непосредственное моделирование влечет значительные вычислительные затраты. В настоящей работе рассматривается вопрос создания упрощенного способа учета механической работы уплотнителя в конструкции окна при ее конечно-элементном моделировании в виде специального граничного условия, которое будет имитировать передачу усилия с одного элемента окна на другой через уплотнитель. При этом данное граничное условие будет учитывать зависимость силы реакции отпора уплотнителя от степени его обжатия. Для проверки предлагаемого подхода к выполнению упрощенного моделирования оконного уплотнителя

предлагается провести сравнительные расчеты с одинаковыми нагрузками и условиями закрепления, в которых в одном случае уплотнитель будет моделироваться непосредственно, а в другом — заменен описанным выше граничным условием. Сравнение результатов решения обеих задач позволит судить о точности упрощенного метода расчета.

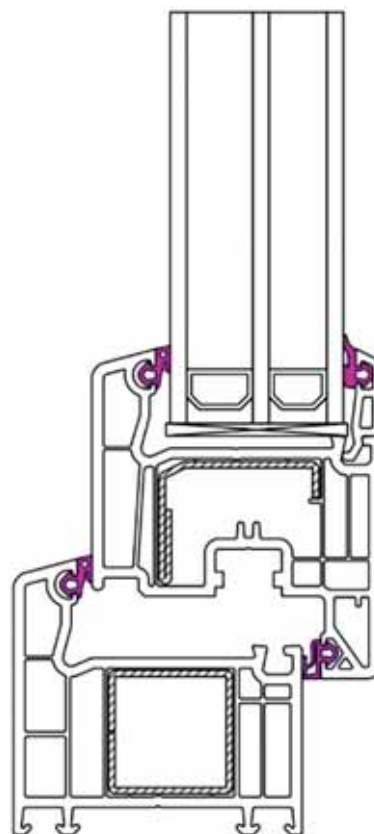


Рис. 1. Уплотнитель в конструкции окна (показан фиолетовым цветом)

Fig. 1. Gasket in the window structure (shown in purple)

Для построения расчетной модели выбрана оконная система из ПВХ профилей Veka Softline с шириной профиля 70 мм и двухкамерным стеклопакетом 42 мм (рис. 1). Геометрия всех использованных в модели элементов соответствует техническому каталогу фирмы Veka.

ПВХ, стекло, а также алюминий (в составе дистанционной рамки стеклопакета) моделировались как идеально упругие материалы, работающие при деформации по закону Гука. Согласно работе [6] среднее значение модуля упругости ПВХ, применяемого для изготовления окон, составляет 2980 МПа, средняя плотность — 1500 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона ПВХ

был принят равным 0,35. В соответствии с трудом [7] модуль упругости листового стекла — 73 000 МПа, плотность — 2500 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона стекла был принят равным 0,25. Механические характеристики алюминия взяты из библиотеки материалов программы COMSOL.

В качестве материала для производства оконных уплотнителей в настоящее время наилучшим образом зарекомендовал себя синтетический этилен-пропиленовый каучук (международное обозначение — EPDM). Он имеет высокую прочность, деформативность, атмосферостойкость и широкий диапазон рабочих температур [8]. EPDM-резина относится к классу эластомеров, которые обладают особыми механическими свойствами. Эластомеры имеют нелинейную зависимость напряжений от деформаций (даже при малых деформациях), являются несжимаемыми (коэффициент Пуассона для EPDM может быть принят равным 0,48 [9]), проявляют эффект Маллинза (снижение жесткости при циклических нагружениях), обладают гистерезисом (кривая нагружения-разгрузки образует петлю). В виду этих особенностей модель обычного упругого материала к эластомерам не применима [10]. Высокая эластичность EPDM-резины приводит к ее значительным деформациям даже при небольших нагрузках, поэтому для описания ее напряженно-деформированного состояния (НДС) необходимо пользоваться теорией упругости конечных деформаций, что еще больше усложняет постановку задачи [11, 12]. К настоящему моменту разработано множество моделей гиперупругих материалов. Выбор той или иной модели возможен только при наличии экспериментальных данных о механической работе образца моделируемого материала (кривые нагружения при одноосном/двухосном растяжении/сжатии, кручении, сдвиге и т.д.). Результаты механических испытаний EPDM-резины в различных постановках приведены в исследованиях [13–15].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью определения расчетных параметров EPDM-резины и назначения корректной модели ее работы при действии механических нагрузок рассмотрим детально ряд проведенных научных исследований. В работе [13] приводятся результаты квазистационарного одноосного нагружения прямоугольного образца EPDM-резины размерами (Д × Ш × Т) 6,5 × 7,5 × 1,6 мм. Кривая нагружения показана на рис. 2. Она состоит из 12 циклов нагружения-разгрузки. При первых трех циклах относительные деформации доводились до максимального значения 0,5 (на оси абсцисс графика показано отношение  $l'/l$ , в то время как  $\varepsilon = (l'/l - 1)$ ), при вторых трех — до 1, затем до 1,5, и, в конечном итоге, до 2. Скорость нагружения составляла 0,004 с<sup>-1</sup>. На графике хорошо видны многие из описанных выше особенностей механической работы эластоме-

ров. Главная из них заключается в том, что механический отклик материала зависит от максимальной деформации, которой он был подвергнут ранее. Заранее неизвестно, какие максимальные деформации достигаются в оконном уплотнителе. Введем предположение о том, что максимальные главные деформации в уплотнителе, работающем в нормативном диапазоне нагрузок, не превышают 1. Также примем, что уплотнитель в процессе эксплуатации испытывает многократные циклы нагрузки-разгрузки, в результате чего эффект Маллинза перестает изменять кривую нагрузки, и она приобретает постоянные очертания (как сообщается в публикации [13], этот момент наступает после пяти циклов нагружения). Эти предпосылки позволяют выделить из диаграммы кривую 6, которая будет максимально точно характеризовать механическую работу материала уплотнителя.

Выбранная кривая образует петлю (она не замкнута на оси абсцисс, так как трех циклов недостаточно для того, чтобы установилась постоянная величина пластических деформаций), которая демонстрирует гистерезис материала. Верхняя часть петли — напряжения при нагружении, нижняя — при разгрузке. Все нагрузки, которые воспринимает уплотнитель, приводят к его обжатию, поэтому важен механический отклик уплотнителя именно в процессе нагружения (возрастания деформаций). Исходя из этого в качестве характерной кривой выберем верхнюю часть петли 6 на рис. 2. В то же время проигнорируем наличие пластических деформаций, которые для рассматриваемого материала являются незначительными (кривая будет начинаться в точке (0,0)). В конечном итоге получаем зависимость  $\sigma - \varepsilon$ , показанную на рис. 3. На кривой  $\sigma - \varepsilon$  выбраны 11 точек, координаты которых были переведены в табличный вид, значения кривой в этих 11 точках и будут использоваться в дальнейшем.

В качестве модели гиперупругого материала для прямого расчета уплотнителя выбрана модель Йео (Yeoh), предложенная в работе [16]. В ней для описания механических характеристик материала применяются три константы ( $c_1, c_2, c_3$ ). Помимо этих констант необходимо знать модуль объемной упругости материала  $K$ . Он определяется по формуле:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}.$$

Судя по диаграмме на рис. 3, начальный модуль упругости EPDM-резины составляет  $E = 2,43$  МПа [8]. Коэффициент Пуассона равен  $\mu = 0,48$  [9]. В таком случае модуль объемной упругости материала  $K$  составит:

$$K = \frac{2,43}{3(1 - 2 \cdot 0,48)} = 20,25 \text{ МПа}.$$

Это значение будет использоваться в последующих расчетах.

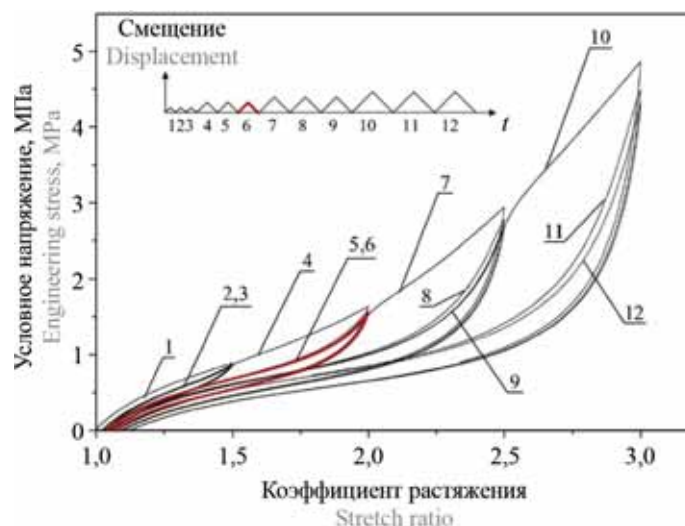
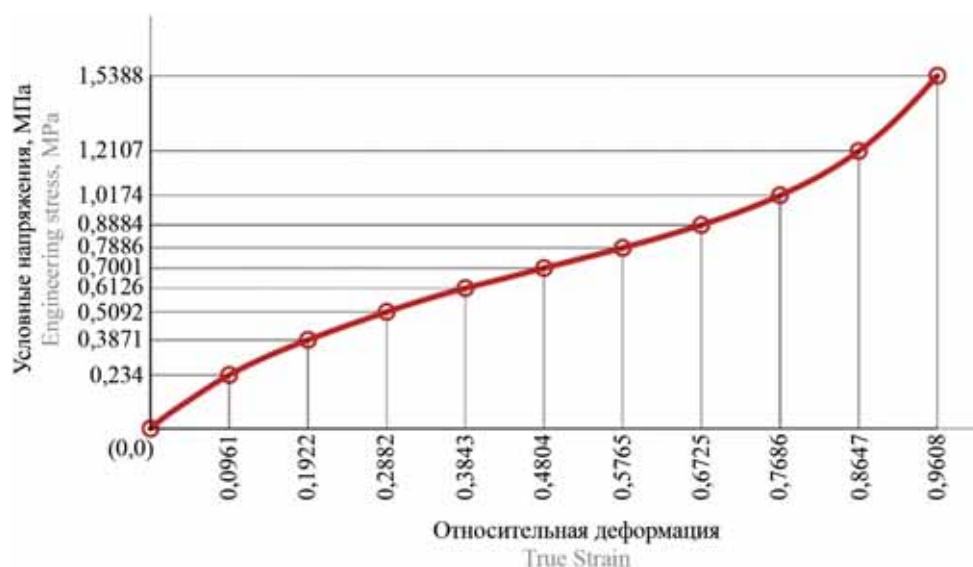


Рис. 2. Кривая одноосного нагружения образца EPDM-резины [13]

Fig. 2. Uniaxial loading curve of an EPDM rubber specimen [13]

Рис. 3. Зависимость  $\sigma - \epsilon$  материала уплотнителя, принятая для расчетаFig. 3. The  $\sigma - \epsilon$  dependence of the gasket material used for the computation

Определяли константы  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  с помощью модуля General Optimization программы COMSOL Multiphysics. В программе COMSOL сформулирована задача, подобная описанному в труде [13] эксперименту, — параллелепипед из EPDM-резины размерами  $6,5 \times 7,5 \times 1,6$  мм был подвергнут одноосному растяжению, при этом записывался график  $\sigma - \epsilon$ . Модуль General Optimization позволил подобрать такие значения констант  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , при которых полученный в расчете график  $\sigma - \epsilon$  наилучшим образом совпал с определенным экспериментально (рис. 4). Значения констант материала при этом оказались равны:  $c_1 = 339\,357$  Па,  $c_2 = -117\,196$  Па,  $c_3 = 33\,303$  Па.

Для дальнейшей проверки корректности выбранной модели материала (и подобранных значений  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ) проведено сравнение расчета с результатами эксперимента на одноосное сжатие образца EPDM-резины, представленными в публикации [14]. В эксперименте образец цилиндрической формы (8 мм в диаметре и 6 мм в высоту) подвергался сжатию с различной скоростью. Полученные при этом в работе [14] графики  $\sigma - \epsilon$  показаны на рис. 5.

Как видно, кривая сильно зависит от скорости нагружения, но во всех случаях она явно состоит из двух участков: участка пропорциональности (с постоянным значением модуля упругости) и участка упрочнения. Представленные данные нельзя исполь-

зывать совместно с данными на одноосное растяжение для определения констант материала, так как образцы материалов в этих двух экспериментах были различны и, следовательно, могли иметь различные механические характеристики. Приведенные на рис. 5 диаграммы возможно применять лишь для качественной оценки того, насколько правдоподобно принятая модель имитирует работу материала на сжатие. В COMSOL была поставлена задача, подобная описанному в труде [14] эксперименту, в которой исполь-

зовались параметры  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , установленные на предыдущем этапе. Полученная при решении этой задачи диаграмма нагружения представлена на рис. 6.

Как следует из рис. 6, характер работы выбранной модели на сжатие схож с данными экспериментальных испытаний, отличия заключаются в меньшем начальном модуле упругости и менее выраженном участке упрочнения.

Все принятые в расчетах параметры материалов показаны в табл. 1.

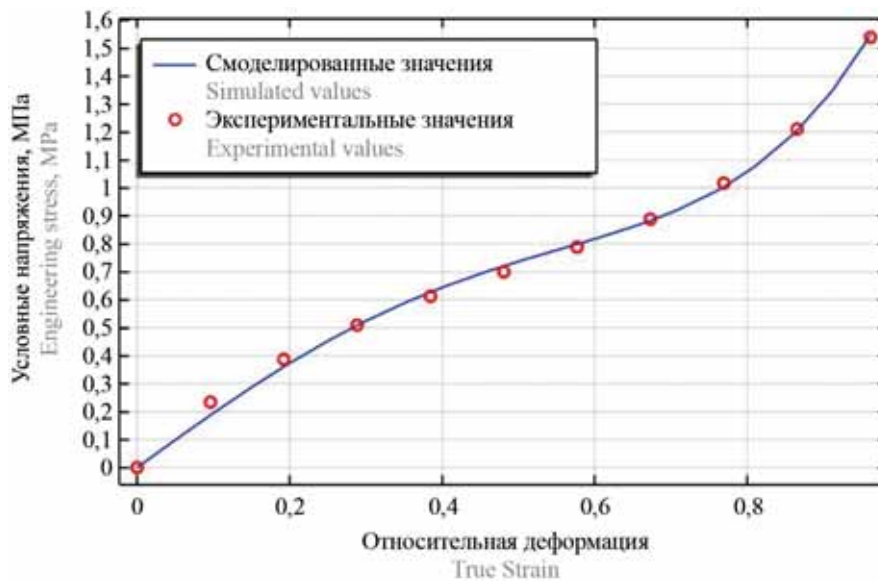


Рис. 4. Результат подбора констант материала в модели Йео (Yeoh)

Fig. 4. The result of determining the material constants for the Yeoh model

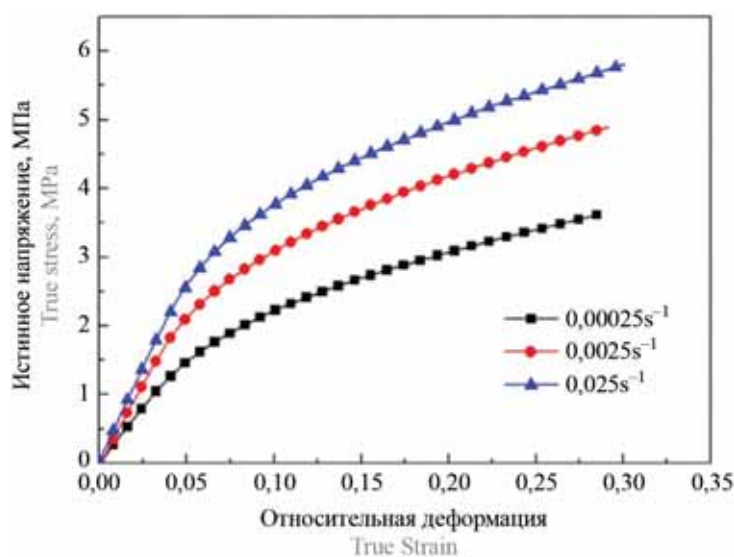


Рис. 5. Результаты эксперимента на одноосное сжатие образца EPDM-резины [14]

Fig. 5. The experiment on uniaxial compression of an EPDM rubber specimen [14]

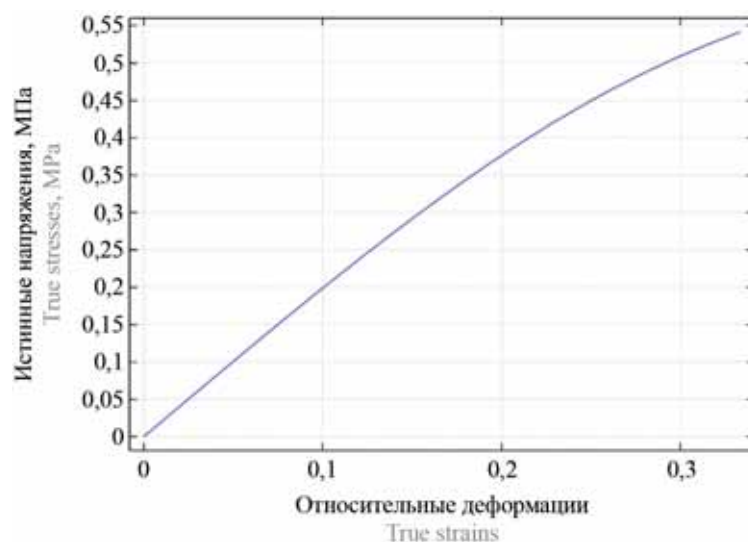


Рис. 6. Результаты расчета на сжатие

Fig. 6. The results of the compression computation

Табл. 1. Принятые для расчета механические параметры материалов

Table 1. Mechanical parameters of materials accepted for calculation

| Модель материала<br>Material model                                              | Материал<br>Material | Параметр<br>Parameter                                | Значение<br>Value                          |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Идеально-упругая<br>Perfectly elastic                                           | ПВХ<br>PVC           | Модуль упругости $E$<br>Elastic modulus $E$          | 2980 МПа / MPa                             |
|                                                                                 |                      | Коэффициент Пуассона $\mu$<br>Poisson's ratio $\mu$  | 0,35                                       |
|                                                                                 |                      | Плотность $\rho$<br>Density $\rho$                   | 1500 кг/м <sup>3</sup> / kg/m <sup>3</sup> |
|                                                                                 | Стекло<br>Glass      | Модуль упругости $E$<br>Elastic modulus $E$          | 73 000 МПа / MPa                           |
|                                                                                 |                      | Коэффициент Пуассона $\mu$<br>Poisson's ratio $\mu$  | 0,25                                       |
|                                                                                 |                      | Плотность $\rho$<br>Density $\rho$                   | 2500 кг/м <sup>3</sup> / kg/m <sup>3</sup> |
|                                                                                 | Алюминий<br>Aluminum | Модуль упругости $E$<br>Elastic modulus $E$          | 70 000 МПа / MPa                           |
|                                                                                 |                      | Коэффициент Пуассона $\mu$<br>Poisson's ratio $\mu$  | 0,33                                       |
|                                                                                 |                      | Плотность $\rho$<br>Density $\rho$                   | 2700 кг/м <sup>3</sup> / kg/m <sup>3</sup> |
| Модель Йео (Yeoh) — гиперупругий материал<br>Yeoh model — hyperelastic material | EPDM                 | Параметр материала $c_1$<br>$c_1$ material parameter | 339 357 Па / Pa                            |
|                                                                                 |                      | Параметр материала $c_2$<br>$c_2$ material parameter | -117 196 Па / Pa                           |
|                                                                                 |                      | Параметр материала $c_3$<br>$c_3$ material parameter | 33 303 Па / Pa                             |
|                                                                                 |                      | Модуль объемной упругости $K$<br>Bulk modulus $K$    | 20,25 МПа / MPa                            |
|                                                                                 |                      | Плотность $\rho$<br>Density $\rho$                   | 1000 кг/м <sup>3</sup> / kg/m <sup>3</sup> |

Все расчеты механической работы уплотнителя проведены в плоско-деформированной двухмерной постановке. В то же время, уплотнитель представляет собой протяженное упругое тело, воспринимающее поверхностные нагрузки перпендикулярно своей продольной оси. При этом смежные с уплотнителем элементы окна (стеклопакет, ПВХ профиль) имеют жесткость, во много раз превосходящую жесткость самого уплотнителя (так, модуль упругости EPDM-резины в начальный момент нагружения равен 2,43 МПа, что в 1200 раз меньше модуля упругости ПВХ и в 30 000 раз меньше модуля упругости стекла). Таким образом, можно считать, что поперечное сечение уплотнителя (расположенное в осях  $x$ – $y$ ) работает именно в плоско-деформированном состоянии. В процессе расчета для определения величин, распределенных по площади, предполагалось, что продольный размер модели (в направлении оси  $z$ ) составляет 1 м.

На первом этапе выявлялась сила реакции отпора уплотнителя при его обжатии. При выполнении этого расчета все тела, смежные с уплотнителем, считались абсолютно жесткими, благодаря этому отпадала необходимость рассчитывать в них поля напряжений. Расчет проводился в два этапа:

1. Рассчитывались начальные деформации уплотнителя, вставленного в паз ПВХ профиля. На данном этапе не прикладывались никакие внешние нагрузки, а определялось, какую форму примет уплотнитель при контактном взаимодействии с ПВХ профилем (рис. 7). В качестве примера здесь и далее будут показаны результаты расчета для уплотнителя оконного штапика.

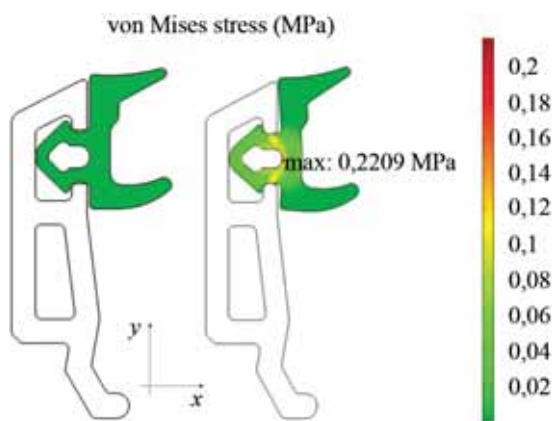


Рис. 7. НДС уплотнителя, вставленного в паз профиля (профиль представляет собой абсолютно жесткое тело): слева — начальное положение уплотнителя; справа — уплотнитель сжат ПВХ профилем

Fig. 7. The stress-strain state of the gasket inserted into the groove (the bead is a rigid body); on the left — the initial position of the gasket, on the right — the gasket is compressed by the PVC profile

2. Размещенный в профиле уплотнитель прижимался к профилю абсолютно жесткой пластиной (в данном примере эта пластина имитирует поверхность стеклопакета, обжимающую уплотнитель), для которой задавались последовательные смещения по оси  $x$ , а поворот и смещение по оси  $y$  были запрещены. При этом записывались силы реакции, возникающие в пластине, по которым в дальнейшем можно установить положение и величину равнодействующей силам контактного давления, возникающим между уплотнителем и пластиной. В качестве переменной, определяющей положение пластины, было принято расстояние между стеклянной пластиной и штапиком (рис. 8). На рис. 8 также показаны искомые равнодействующие силы ( $F1$  — сила, действующая со стороны уплотнителя на прижимную стеклянную пластину;  $F2$  — сила, действующая со стороны уплотнителя на профиль, в котором он закреплен). Поскольку уплотнитель рассматривается в состоянии равновесия, силы  $F1$  и  $F2$  должны быть равны по модулю, противоположны по направлению и лежать на одной прямой.

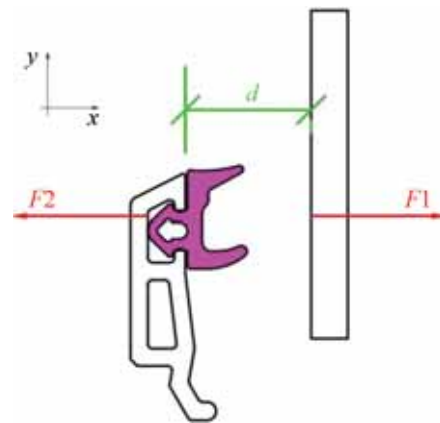


Рис. 8. Расчетная схема

Fig. 8. Design model

На рис. 9 представлены решения, установленные при различном значении параметра  $d$ . При расчете уплотнителя параметр  $d$  варьировался от 7 мм (прижимная пластина расположена близко от уплотнителя, но не касается его) до 3,75 мм (пластина плотно прижимает уплотнитель) с шагом 0,25 мм. Полученные при этом силы реакции пластины приведены в табл. 2. Момент  $M_z$  рассчитывался относительно геометрического центра пластины.

По значению момента  $M_z$  можно определить координату  $y_{рд}$  равнодействующей сил контактного давления. Будем отсчитывать  $y_{рд}$  от нижней поверхности паза штапика (рис. 10).

Рассчитанные для уплотнителя значения  $y_{рд}$  показаны в табл. 3.

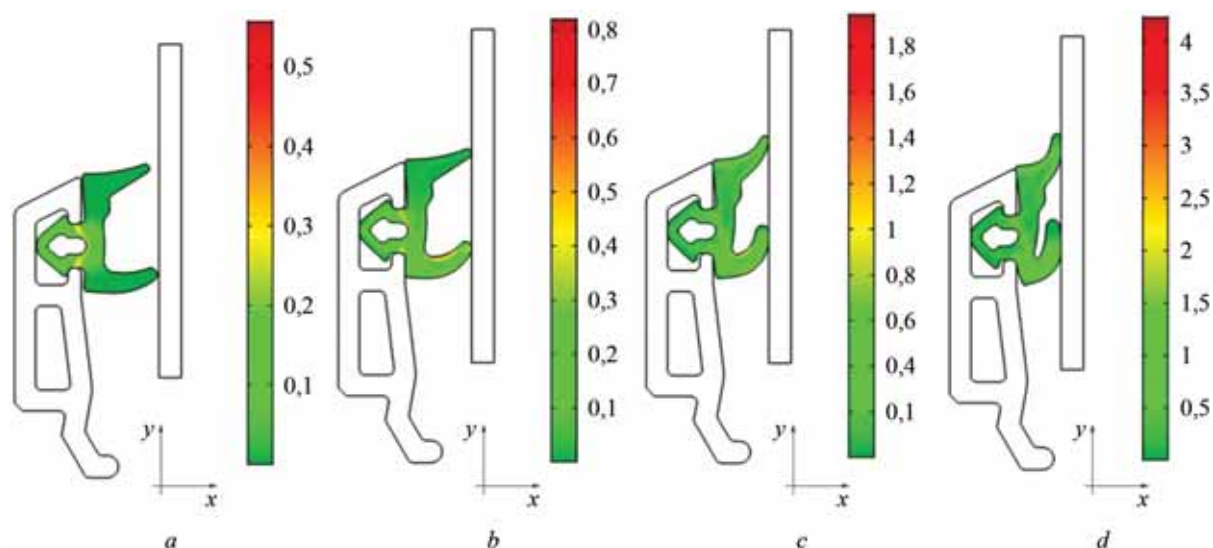


Рис. 9. НДС уплотнителя при различном положении прижимной пластины (легенда напряжений в МПа): а —  $d = 7$  мм; б —  $d = 6$  мм; в —  $d = 5$  мм; д —  $d = 4$  мм

Fig. 9. The gasket stress-strain state at different positions of the pressure plate (stress legend in MPa): а —  $d = 7$  мм; б —  $d = 6$  мм; в —  $d = 5$  мм; д —  $d = 4$  мм

Табл. 2. Результаты расчета силы реакции отпора уплотнителя при его обжатии

Table 2. The results of calculation of the gasket reaction force when it's compressed

| $d$ , мм / mm | $N_x$ , Н / N | $M_z$ , Н · м / N · m |
|---------------|---------------|-----------------------|
| 7,00          | 0             | 0                     |
| 6,75          | 6,15          | 0,036                 |
| 6,50          | 35,12         | 0,203                 |
| 6,25          | 70,78         | 0,358                 |
| 6,00          | 89,36         | 0,381                 |
| 5,75          | 124,19        | 0,293                 |
| 5,50          | 147,55        | 0,207                 |
| 5,25          | 163,49        | 0,115                 |
| 5,00          | 185,26        | 0,084                 |
| 4,75          | 214,49        | 0,100                 |
| 4,50          | 253,06        | 0,132                 |
| 4,25          | 305,22        | 0,150                 |
| 4,00          | 373,33        | 0,163                 |
| 3,75          | 460,05        | 0,179                 |

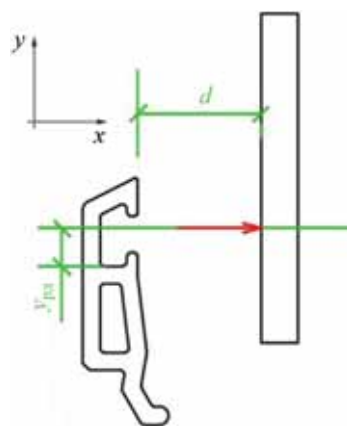


Рис. 10. Положение равнодействующей сил контактного давления

Fig. 10. Position of the resultant contact pressure force

Табл. 3. Положение силы реакции отпора уплотнителя в зависимости от степени его обжатия

Table 3. The position of the reaction force of the gasket depending on the degree of its compression

| $d$ , мм / mm | Обжатие уплотнителя, мм<br>Compression of the gasket, mm | $N_x$ , Н / N | $y_{pd}$ , мм / mm | Касание ножек уплотнителя<br>Gasket leg touch, mm |
|---------------|----------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| 7,00          | 0                                                        | 0             | 0                  | Нет<br>No                                         |
| 6,75          | 0,25                                                     | 15,3          | 0,83               | Нижняя<br>Bottom                                  |

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

| $d$ , мм / mm | Обжатие уплотнителя, мм<br>Compression of the gasket, mm | $N_x$ , Н / N | $y_{рд}$ , мм / mm | Касание ножек уплотнителя<br>Gasket leg touch, mm |
|---------------|----------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| 6,50          | 0,50                                                     | 86,9          | 0,87               | Нижняя<br>Bottom                                  |
| 6,25          | 0,75                                                     | 175,9         | 1,59               | Нижняя<br>Bottom                                  |
| 6,00          | 1,00                                                     | 223,6         | 2,38               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 5,75          | 1,25                                                     | 311,7         | 4,29               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 5,50          | 1,50                                                     | 369,9         | 5,24               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 5,25          | 1,75                                                     | 414,0         | 5,95               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 5,00          | 2,00                                                     | 472,8         | 6,20               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 4,75          | 2,25                                                     | 552,2         | 6,18               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 4,50          | 2,50                                                     | 657,6         | 6,13               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 4,25          | 2,75                                                     | 800,9         | 6,16               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 4,00          | 3,00                                                     | 988,1         | 6,21               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |
| 3,75          | 3,25                                                     | 1228,6        | 6,26               | Нижняя + верхняя<br>Bottom + top                  |

Из табл. 3 видно, что точка приложения равнодействующей сил давления при прижатии пластины к уплотнителю перемещается вверх. Это происходит из-за того, что изначально пластина касается только нижней ножки уплотнителя, затем она приходит в контакт и с верхней ножкой, что перемещает равнодействующую вверх. Рассчитываемый уплотнитель имеет в недеформированном состоянии длину ножек порядка 6,7 мм. При этом в техническом каталоге Veka указано, что рассматриваемый в работе уплотнитель должен закрывать зазор 3–5 мм, т.е. его минимальное обжатие составляет 1,7 мм. При обжатии 1,7 мм и более величина  $y_{рд}$  почти не изменяется, поэтому ее можно считать постоянной и равной среднему значению величин, выделенных в табл. 3 серым цветом. Примем в дальнейшем  $y_{рд} = 6,2$  мм. Таким образом, известны точка приложения равнодействующей сил контактного давления и функция  $F(d)$ , описывающая зависимость модуля равнодействующей от расстояния между стеклом и штапиком. Теперь можно заменить уплотнитель в модели на специальное граничное условие, использующее функцию  $F(d)$ . В качестве такого граничного условия предлагается использовать условие Contact с использованием метода штрафных функций [17], реализованное в COMSOL. При его применении в случае контакта (пересечения) двух поверхностей между ними создаются связи в виде упругих пружин (рис. 11), которые передают усилия с одной поверхности на другую.

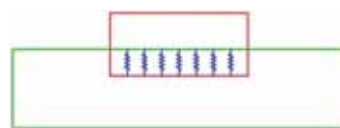


Рис. 11. Реализация условия Contact с использованием метода штрафных функций

Fig. 11. Implementation of the Contact condition using the penalty function method

Особенность данного метода состоит в том, что пользователь может контролировать жесткость  $p_n$  упругих связей, возникающих между поверхностями, также COMSOL позволяет задать ненулевое расстояние по нормали от любой из поверхностей  $d_{offset}$ , на котором данные связи начинают действовать, что дает возможность смоделировать своего рода мнимый контакт. Заменяя геометрию уплотнителя на граничное условие Contact, необходимо:

1. Изменить геометрию штапика таким образом, чтобы на его стороне, обращенной к стеклу, была сформирована поверхность для задания граничного условия Contact. Центр этой поверхности должен располагаться на уровне приложения равнодействующей силы давления. Ширина поверхности может быть произвольной (рис. 12).

2. Задать значение величины  $d_{offset}$ , равное ширине уплотнителя до обжатия. Для рассмотренного уплотнителя  $d_{offset} \approx 7$  мм.

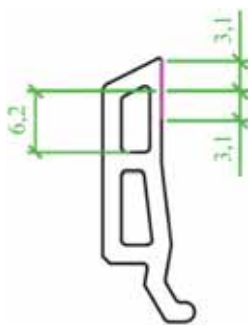


Рис. 12. Штапик с измененной геометрией

Fig. 12. A bead with a modified geometry

3. На основе функции  $F(d)$  и ширины «псевдо-контактной» поверхности (6,2 мм на рис. 12) получить функцию  $p_n(d)$  и использовать ее в интерфейсе COMSOL для расчета величины  $p_n$  граничного условия Contact.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того чтобы убедиться, что описанные мероприятия обеспечивают адекватную замену уплотнителя в модели окна, была сформирована новая задача с двумя подходами к решению (и тоже в плоско-деформированной постановке). В первом моделировалась система «стеклопакет – уплотнитель – штапик – профиль створки», во втором — система «стеклопакет – штапик – профиль створки» с использованием описанного условия Contact между стеклом и штапиком (рис. 13). Размер окна по вертикали в обеих задачах составил 1,5 м. В обеих задачах профиль створки был закреплен в фурнитурном пазе, на стеклопакет действовало равномерно распределенное давление 0,3 кПа, прижимающее стеклопакет к уплотнителю; стекло, штапик и профиль створки рассчитывались как упругие, а не жесткие тела. В результате проводилось сравнение НДС элементов окна, полученное в двух вариантах решения.

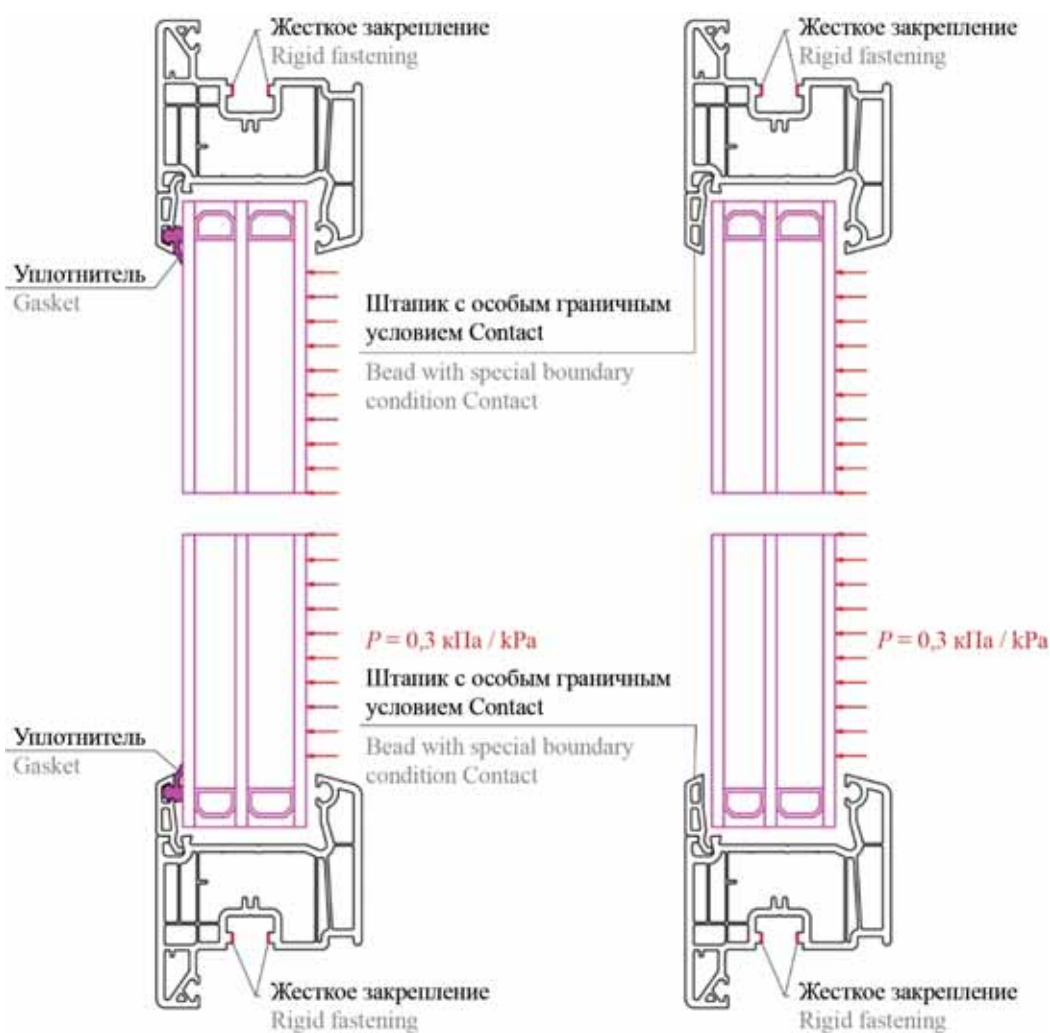


Рис. 13. Два варианта постановки тестовой задачи

Fig. 13. Two options for setting the test problem

На рис. 14 представлено НДС в первой и второй постановке. Максимальные перемещения и напряжения для стеклопакета и профиля створки для обоих вариантов приведены в табл. 4 (точка с максимальным перемещением для стеклопакета находится в его центре и не показана на рис. 14).

Как видно из рис. 14 и табл. 4, принятый метод упрощенного моделирования механической работы уплотнителя дает результат, почти полностью иден-

тичный результату, полученному при полном расчете НДС уплотнителя. Размеры граничных элементов и настройки решения, использованные в обеих задачах, были одинаковы, тем не менее для решения задачи во второй постановке потребовалось в 4,7 раз меньше времени, чем для решения задачи в первой постановке (9 минут против 43), что говорит также и о значительной эффективности данного метода.

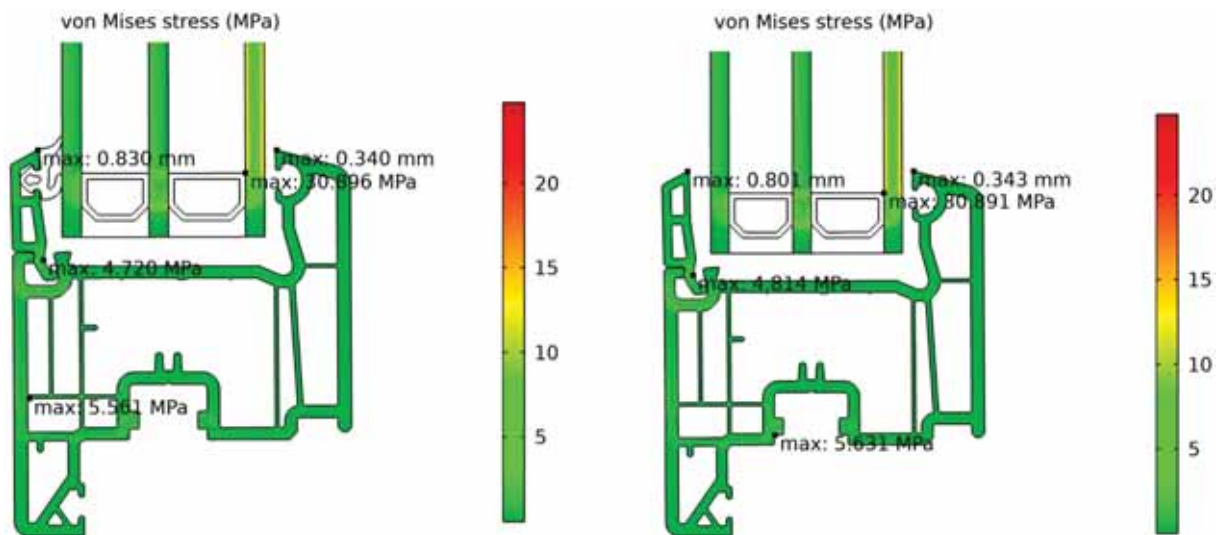


Рис. 14. Результат решения задачи в первой (слева) и второй (справа) постановке (легенда напряжений в МПа, максимальные перемещения в мм)

Fig. 14. The result of solving the problem in the 1st (left) and 2nd (right) setting (the legend of stresses in MPa, maximum displacements in mm)

Табл. 4. Сравнение максимальных перемещений и напряжений

Table 4. Comparison of maximum displacements and stresses

| Перемещения<br>Displacement                              | Элемент<br>Element | Первая постановка<br>1st setting | Вторая постановка<br>2nd setting | Разница, %<br>Difference, % |
|----------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Максимальные перемещения, мм<br>Maximum displacement, mm | Стекло<br>Glass    | 12,221                           | 12,236                           | 0,12                        |
|                                                          | Створка<br>Wing    | 0,340                            | 0,343                            | 0,88                        |
| Максимальные напряжения, МПа<br>Maximum stresses, MPa    | Стекло<br>Glass    | 30,896                           | 30,891                           | 0,02                        |
|                                                          | Створка<br>Wing    | 5,561                            | 5,631                            | 1,26                        |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе описаны основные проблемы, возникающие при моделировании гиперупругого материала, такого как EPDM-резина, из которой изготавливают уплотнители для современных оконных конструкций.

С помощью анализа данных лабораторных испытаний образца EPDM-резины, проведенных сто-

ронными исследователями, определены константы модели гиперупругого материала Йео (Yeoh) для конечно-элементного моделирования механической работы оконного уплотнителя.

На основе решения плоско-деформированной задачи об обжатии уплотнителя получена зависимость силы реакции механического отпора уплотнителя от степени его обжатия. Данная зависимость может быть также выявлена экспериментальным

путем. Подобный эксперимент позволит проверить точность расчетов и может стать перспективной темой для дальнейших исследований.

Полученная зависимость реакции отпора уплотнителя была использована для формулирования специального граничного условия, которое дает возможность имитировать передачу усилия с одного элемента окна на другой через уплотнитель.

Осуществлен расчет тестовой задачи о нагружении системы «стеклопакет – профиль створки» в двух вариантах: с уплотнителем, моделируемым непосредственно, и без уплотнителя, но с использованием специального граничного условия, имитирующего работу уплотнителя. Сравнение результатов расчета показало, что предлагаемое упрощение дает решение,

близкое к решению задачи в полноценной постановке, и значительно сокращает время решения.

Целью современных исследований в области проектирования светопрозрачных конструкций должно стать всестороннее изучение реальной работы элементов окна в условиях эксплуатации [18, 19]. Для правдоподобного описания механической работы уплотнителя необходимо также учитывать изменения его механических свойств при изменении состояния окружающей среды (зимой существует значительный перепад температур между внутренней и наружной поверхностью окна), а также вследствие деградации материала [20]. Вопрос о том, как эти факторы влияют на механическую работу уплотнителя в системе окна, — тема дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верховский А.А., Зимин А.Н., Потапов С.С. Применимость современных светопрозрачных ограждающих конструкций для климатических регионов России // Жилищное строительство. 2015. № 6. С. 16–19.
2. Шеховцов А.В. Воздухопроницаемость оконного блока из ПВХ профилей при действии отрицательных температур // Вестник МГСУ. 2011. № 3–1. С. 263–269.
3. Елдашов Ю.А., Сесюнин С.Г., Ковров В.Н. Экспериментальное исследование типовых оконных блоков на геометрическую стабильность и приведенное сопротивление теплопередаче от действия тепловых нагрузок // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 146–149.
4. Константинов А.П., Верховский А.А. Влияние отрицательных температур на теплотехнические характеристики оконных блоков из ПВХ профилей // Строительство и реконструкция. 2019. № 3 (83). С. 72–82. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-83-3-72-82
5. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the negative temperatures influence on the PVC windows air permeability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. P. 022092. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022092
6. Борискина И.В., Шведов Н.В., Плотников А.А. Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий. Справочник проектировщика. Том II. Оконные конструкции из ПВХ. СПб.: НИУПЦ «Межрегиональный институт окна», 2005. 320 с.
7. Борискина И.В. Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. СПб.: Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, 2012. 400 с.
8. Новохионов В.В. ТРЕ-V — это все лучшее от термоэластопластов и ЕПДМ-резины // Оконное производство. 2017. № 52. С. 52–53.
9. Коробейников С.Н., Кургузов В.Д., Ларичкин А.Ю., Олейников А.А. Компьютерное моделирование деформирования эластомеров // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 1–1 (81). С. 165–169. DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.1-37
10. Ali A., Hosseini M., Sahari B. A review of constitutive models for rubber-like materials // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010. Vol. 3. Issue 1. Pp. 232–239. DOI: 10.3844/ajeassp.2010.232.239
11. Лурье А. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
12. Поздеев А.А., Трусов А.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. М.: Наука, 1986. 230 с.
13. Cheng M., Chen W. Experimental investigation of the stress–stretch behavior of EPDM rubber with loading rate effects // International Journal of Solids and Structures. 2003. Vol. 40. Issue 18. Pp. 4749–4768. DOI: 10.1016/s0020-7683(03)00182-3
14. Jiang J., Xu J.-S., Zhang Z.-S., Chen X. Rate-dependent compressive behavior of EPDM insulation: Experimental and constitutive analysis // Mechanics of Materials. 2016. Vol. 96. Pp. 30–38. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.02.003
15. Buckley C., Abraham F., De Focatiis D. Multi-axial viscoelastic deformation of carbon-black filled EPDM rubber // Constitutive Models for Rubber VI. 2009. Pp. 187–192. DOI: 10.1201/NOE0415563277.ch31
16. Holzapfel G. Nonlinear solid mechanics: A continuum approach for engineering. John Wiley & Sons, 2000. 455 p.
17. Hamad F., Giridharan S., Moormann C. A penalty function method for modelling frictional contact in MPM // Procedia Engineering. 2017. Vol. 175. Pp. 116–123. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.038

18. Константинов А.П. Вопросы расчета оконных блоков из ПВХ на ветровую нагрузку // Перспективы науки. 2018. № 1 (100). С. 26–30.

19. Константинов А.П., Ибрагимов А.М. Комплексный подход к расчету и проектированию светопрозрачных конструкций // Жилищное строитель-

ство. 2019. № 1–2. С. 14–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-1-2-14-17

20. Nakamura T., Chaikumpollert O., Yamamoto Y., Ohtake Y., Kawahara S. Degradation of EPDM seal used for water supplying system // Polymer Degradation and Stability. 2011. Vol. 96. Issue 7. Pp. 1236–1241. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.04.007

Поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 16 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 10 марта 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Иван Сергеевич Аксенов — преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1037239, Scopus: 57209195917, ResearcherID: AAF-6118-2021, ORCID: 0000-0003-0689-3498; ivanak1995@mail.ru;

Александр Петрович Константинов — кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 955350, Scopus: 57201183847, ResearcherID: V-2172-2018, ORCID: 0000-0001-6093-8496; apkonst@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Verkhovsky A.A., Zimin A.N., Potapov S.S. The applicability of modern translucent walling for the climatic regions of Russia. *Housing Construction*. 2015; 6:16–19. (rus.).
2. Shekhovtsov A. Air permeability of an PVC-window when exposed to freezing temperatures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-1:263–269. (rus.).
3. Eldashov Yu.A., Sesyunin S.G., Kovrov V.N. Experimental study of typical window blocks on the geometric stability and reduced resistance to heat transfer from the action of thermal loads. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 3:146–149. (rus.).
4. Konstantinov A.P., Verkhovsky A.A. Influence of negative temperatures on the thermal characteristics of PVC windows. *Building and Reconstruction*. 2018; 3(83):72–82. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-83-3-72-82 (rus.).
5. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the negative temperatures influence on the PVC windows air permeability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:022092. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022092
6. Boriskina I.V., Shvedov N.V., Plotnikov A.A. *Modern translucent structures of civil buildings. The designer's reference book. Volume II. PVC window structures*. Saint-Petersburg, NIUPTs "Interregional Institute of the Window", 2005; 320. (rus.).
7. Boriskina I.V. *Buildings and structures with translucent facades and roofs. Theoretical foundations of the design of translucent structures*. Saint-Petersburg, Engineering and Information Center for Window Systems, 2012; 400. (rus.).
8. Novokshonov V.V. TPE-V is all the best from thermoplastic elastomers and EPDM rubbers. *Window Manufacturing*. 2017; 52:52–53. (rus.).
9. Korobeynikov S.N., Kurguzov V.D., Larichkin A.Yu., Oleinikov A.A. Computer simulation of elastomer deformations. *Izvestiya of Altai State University*. 2014; 1-1(81):165–169. DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.1-37 (rus.).
10. Ali A., Hosseini M., Sahari B. A review of constitutive models for rubber-like materials. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010; 3(1):232–239. DOI: 10.3844/ajeassp.2010.232.239
11. Lur'e A. *Nonlinear theory of elasticity*. Moscow, Nauka, 1980; 512. (rus.).
12. Pozdeev A.A., Trusov A.V., Nyashin Yu.I. *Large elastic-plastic deformations: theory, algorithms, applications*. Moscow, Nauka, 1986; 232. (rus.).
13. Cheng M., Chen W. Experimental investigation of the stress–stretch behavior of EPDM rubber with loading rate effects. *International Journal of Solids and Structures*. 2003; 40(18):4749–4768. DOI: 10.1016/s0020-7683(03)00182-3
14. Jiang J., Xu J.-S., Zhang Z.-S., Chen X. Rate-dependent compressive behavior of EPDM insulation: Experimental and constitutive analysis. *Mechanics of Materials*. 2016; 96:30–38. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.02.003
15. Buckley C., Abraham F., De Focatiis D. Multi-axial viscoelastic deformation of carbon-black filled EPDM rubber. *Constitutive Models for Rubber VI*. 2009; 187–192. DOI: 10.1201/NOE0415563277.ch31

16. Holzapfel G. *Nonlinear solid mechanics: A continuum approach for engineering*. John Wiley & Sons, 2000; 470.
17. Hamad F., Giridharan S., Moormann C. A penalty function method for modelling frictional contact in MPM. *Procedia Engineering*. 2017; 175:116-123. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.038
18. Konstantinov A.P. Calculation of PVC window blocks for wind load. *Prospects of Science*. 2018; 1(100):26-30. (rus.).
19. Konstantinov A.P., Ibragimov A.M. Complex approach to calculation and design of translucent structures. *Housing Construction*. 2019; 1-2:14-27. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-1-2-14-17 (rus.).
20. Nakamura T., Chaikumpollert O., Yamamoto Y., Ohtake Y., Kawahara S. Degradation of EPDM seal used for water supplying system. *Polymer Degradation and Stability*. 2011; 96(7):1236-1241. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.04.007

Received February 16, 2021.

Adopted in revised form on February 16, 2021.

Approved for publication on March 10, 2021.

**BIONOTES:** **Ivan S. Aksenov** — lecturer of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1037239, Scopus: 57209195917, ResearcherID: AAF-6118-2021, ORCID: 0000-0003-0689-3498; ivanak1995@mail.ru;

**Aleksandr P. Konstantinov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 955350, Scopus: 57201183847, ResearcherID: V-2172-2018, ORCID: 0000-0001-6093-8496; apkonst@yandex.ru.

## Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке

В.С. Уткин, Л.А. Сушев, С.А. Соловьев

Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрена работа сваи в свайном основании фундамента, по-новому описана система механических воздействий на нее для расчета сваи по осадке фундамента с учетом распределения упругой деформации материала сваи в грунте основания.

**Материалы и методы.** В отличие от существующих подходов определения осадки сваи за счет упругих деформаций материала сваи, дифференцированно учтены по принципу независимости действия сил воздействия в виде нагрузки от ростверка, сил трения-сцепления на поверхности сваи и фактической реакции на нижнем конце сваи. Предложена новая формула для описания распределения сил трения-сцепления по боковой поверхности сваи. Силы трения-сцепления в однородном грунте основания представлены в виде параболической функции распределения, а не в виде линейно возрастающей, как установлено в нормативных документах.

**Результаты.** Получена формула для расчета осадки сваи за счет упругой деформации материала сваи. Приведены пример расчета осадки сваи по предлагаемой методике и сравнение результатов с существующими методиками. Отрицательные силы трения-сцепления от реакции грунта под нижним концом сваи увеличивают значение упругой деформации ствола сваи.

**Выводы.** Уточненная формула для расчета упругой составляющей осадки сваи позволяет получить меньшее значение осадки по сравнению с нормативным подходом за счет учета влияния сил трения-сцепления грунта по боковой поверхности сваи. Предложенный метод расчета свайных фундаментов по осадке может служить обоснованием резерва несущей способности свайного фундамента по критерию осадки, что даст возможность получить определенный экономический эффект.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** свая, осадка, фундамент, упругая деформация, силы трения, отрицательные силы трения

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Уткин В.С., Сушев Л.А., Соловьев С.А. Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 331–339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339

## Improvement of methods for pile foundations design on settlement

Vladimir S. Utkin, Leonid A. Sushev, Sergey A. Solovev

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper describes a new approach for pile foundations design. The system of mechanical impacts is described in a new way for the pile foundation design based on the foundation settlement taking into account the distribution of elastic deformation of the pile material in a soil base.

**Materials and methods.** In contrast to the existing approaches to determining the pile settlement due to elastic deformations of the pile material, all impacts in the form of load from the pile cap, friction forces on the pile lateral surface and the actual reaction at the pile tip are taken into account differentially according to the principle of forces independence. The new design equation is proposed to describe the distribution of friction forces on the lateral surface of the pile. The friction forces in a homogeneous soil of the base are represented as a parabolic distribution function, and not as a linearly increasing one, as established in the standards.

**Results.** As a result, the equation is obtained for a pile settlement design due to the elastic strain of pile material. An example of calculating the pile settlement according to the proposed method and comparing the results with existing methods is given. Negative friction forces from the reaction of the soil under the lower end of the pile increase the value of the elastic deformation of the pile shaft.

**Conclusions.** The refined equation for calculating the elastic component of the pile settlement makes it possible to obtain a lower value of the settlement in comparison with the standard approach by taking into account the influence of friction forces of the soil along the pile lateral surface. The proposed method for pile foundations design based on the settlement can serve as a justification for the reserve of the load-bearing capacity of the pile foundation according to the settlement criterion which will allow obtaining a certain economic effect.

**KEYWORDS:** pile, settlement, foundation, elastic strain, friction forces, negative skin friction

**FOR CITATION:** Utkin V.S., Sushev L.A., Solovev S.A. Improvement of methods for pile foundations design on settlement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):331-339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

С 2010 г. вступил в силу Федеральный закон РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», согласно которому для несущих элементов строительных конструкций должны обеспечиваться требования механической безопасности — состояние строительных конструкций и оснований, при котором отсутствует недопустимый риск превышения предельных состояний. В качестве одного из требований к обеспечению механической безопасности Законом установлено, что «расчетные модели (в том числе расчетные схемы, основные предпосылки расчета) строительных конструкций и основания должны отражать действительные условия работы здания или сооружения, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации», в частности, должны быть учтены «особенности взаимодействия элементов строительных конструкций между собой и с основанием».

Свайные фундаменты по СП 24.13330.2011 (здесь и далее с изменением № 3 от 25.07.2019) «Свайные фундаменты» рассчитывают по несущей способности фундамента, несущей способности грунта основания и по деформациям (по осадке). Расчет свайных фундаментов с висячими сваями по осадке производится как для условного фундамента на естественном основании.

Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по всем критериям работоспособности происходит постоянно. Например, расчет осадки свай-стойки по СП 24.13330.2011 (от 20.05.2011, без учета изменений № 1–3) с небольшими изменениями и дополнениями по содержанию приведен в СП 24.13330.2011. На обоснованность внесения поправок в редакции СНиПов и СП, в том числе СП 24.13330.2011, указывают авторы статьи [1], в которой приводится информация, направленная на дальнейшее совершенствование расчетов по осадке фундаментов.

В данной работе предлагается рассмотреть вопрос развития расчета составляющей осадки свай в виде упругого укорочения (деформации) свай. Существуют различные подходы, позволяющие дать оценку осадки свай от упругого укорочения. В исследовании [2] представлена следующая зависимость для расчета перемещения (осадки)  $w$  свай:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} = \frac{4}{D_s E_p} f_s(z),$$

где  $D_s$  — диаметр свай;  $E_p$  — модуль упругости материала свай;  $f_s(z)$  — функция распределения сил трения-сцепления по длине свай.

В труде [3] отмечается, что упругое укорочение висячей свай может быть вычислено по формуле:

$$\rho_p = C \frac{Q_{fr}}{A_p E_p},$$

где  $Q_{fr}$  — нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью свай;  $A_p$  — площадь поперечного сечения

свай;  $C$  — коэффициент, принимается равным  $C = 0,5$  для большей части грунтов и  $C = 0,7$  для мягких грунтов.

Также в публикации [3] отмечается, что расчет осадки свай от ее укорочения актуален тогда, когда отношение модуля упругости свай к модулю упругости грунта  $E_p/E_s \leq 500$ .

Предлагается следующая формула для определения упругой составляющей осадки свай [4]:

$$S_E = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p E_p},$$

где  $Q_{wp}$  — нагрузка, воспринимаемая нижним концом свай;  $Q_{ws}$  — нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью свай;  $\xi$  — коэффициент, принимающий значения от 0,5 до 0,67 в зависимости от характера распределения удельного сопротивления трению по стволу свай.

В известной работе Флеминга [5] предпринята попытка учета трех факторов, влияющих на упругое укорочение свай (рис. 1) с круглым поперечным сечением диаметром  $D_s$ .

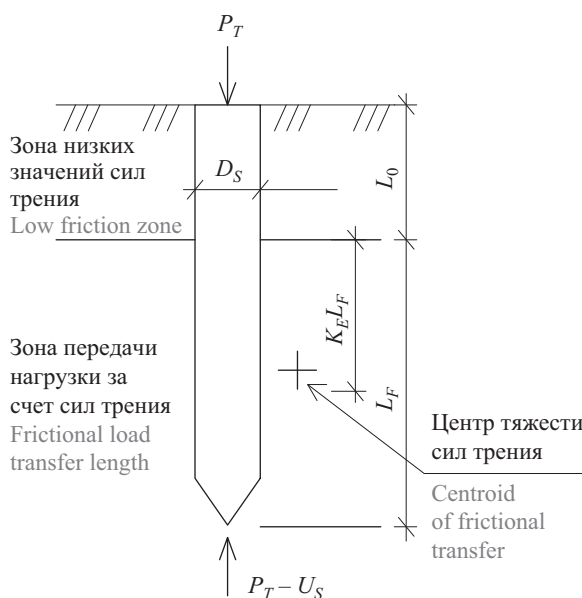


Рис. 1. Решение Флеминга для уточненного расчета упругой составляющей осадки свай от укорочения [5]

Fig. 1. Fleming's solution for a more accurate calculation of the elastic component of pile settlement from shortening [5]

Первая составляющая осадки рассчитывается как  $\Delta_1 = \frac{4}{\pi} \frac{L_0 P_T}{D_s^2 E_c}$ , характеризующая укорочение свай в верхней части основания от нагрузки в зоне низких значений сил трения-сцепления; вторая  $\Delta_2 = \frac{4}{\pi} \frac{K_E L_F P_T}{D_s^2 E_c}$ , характеризующая укорочение свай с учетом влияния сил трения-сцепления, и третья

$$\Delta_3 = \frac{4 L_F (P_T - U_s)}{\pi D_s^2 E_c}, \text{ учитывающая влияние реакции}$$

под нижним концом сваи.

Суммарное значение осадки от упругого укорочения сваи рассчитывается по формуле:

$$\Delta_E = \frac{4}{\pi} \frac{1}{D_s^2 E_c} [P_T (L_0 + L_F) - L_F U_s (1 - K_E)].$$

Недостатком данного подхода является неопределенность в определении высот частей основания и неопределенность в назначении коэффициента  $K_E$ .

В настоящей работе предлагается развитие подхода Флеминга [5] к расчету упругой составляющей осадки сваи и кустов свай с учетом функционального описания сил трения-сцепления и учета отрицательных сил трения-сцепления.

В труде [6] приводятся специальные диаграммы для расчета упругой деформации от укорочения сваи. Проведены экспериментальные исследования, отражающие расчетные ситуации, когда большая часть осадки сваи вызывается за счет упругих деформаций ее укорочения [7]. Рассматривается подробный анализ работы группы свай с учетом деформации укорочения на основе метода граничных элементов [8]. Отмечается развитие деформаций укорочения свай со временем по результатам геотехнического мониторинга [9].

Информация по расчетам осадки свай и групп свай с учетом упругой деформации укорочения свай изучена в публикациях [10–15].

По СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» осадка большеразмерного фундамента (свайного поля) определяется по формуле:

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c, \quad (1)$$

где  $s_{ef}$  — осадка условного фундамента;  $\Delta s_p$  — дополнительная осадка за счет продавливания свай на уровне подошвы условного фундамента;  $\Delta s_c$  — дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи.

Границы условного фундамента в СП 24.13330.2011, содержащегоися сваи, представлены на рис. 2 пунктирными линиями.

Дополнительная осадка за счет сжатия ствола свай  $\Delta s_c$  в выражении (1) рассчитывается по формуле:

$$\Delta s_c = \frac{P(l-a)}{EA}, \quad (2)$$

где  $P = pa^2$  для свай квадратного поперечного сечения и  $P = 0,79pa^2$  для свай круглого поперечного сечения (принимается одинаковой независимо от их расположения в ростверке);  $p$  — среднее давление по подошве условного фундамента;  $l$  — длина сваи;  $E$  — модуль упругости материала сваи;  $A$  — площадь поперечного сечения сваи.

Из формулы (2) видно, что осадка  $\Delta s_c$  определяется от силы  $P$ , приходящейся на одну отдельную сваю при центральном сжатии без учета сил трения

по боковой поверхности сваи, вида и состояния грунта.

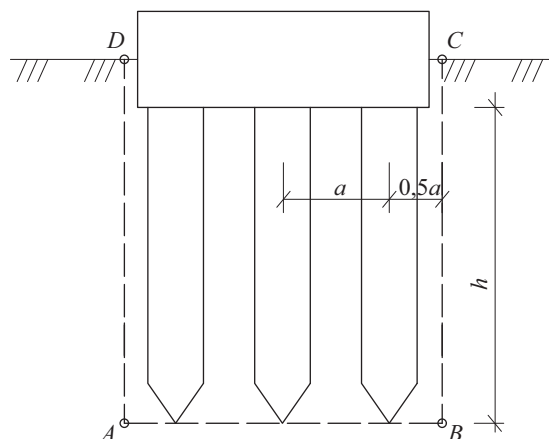


Рис. 2. Условный фундамент для расчета осадки условного свайного фундамента по контуру ABCD в соответствии с СП 24.13330.2011

Fig. 2. Conditional foundation for calculating the settlement of the conditional pile foundation along the ABCD contour in accordance with SP 24.13330.2011

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе предлагается уточнить расчет осадки свайного фундамента путем уточнения значения  $\Delta s_c$  в выражении (1), в отличие от принятой формулы (2) в СП 24.13330.2011.

Для этого рассмотрим фактические воздействия на отдельную сваю со стороны фундамента  $P$  и грунта основания  $f(x)$ ,  $f_{отр}(x)$  и  $\sigma_{гр}$  по расчетной схеме, представленной на рис. 3, в однородном грунте основания.

Влиянием взаимодействия соседних свай через грунт основания за счет увеличения объемного веса грунта в принимаемых по рис. 2 значениях  $a = (0,3-0,6)d$  будем пренебрегать в запас надежности сваи по критерию осадки сваи. Тем более, что увеличение объемного веса грунта вблизи сваи, вызванного влиянием соседних свай, уменьшается со временем в результате неконтролируемой ползучести (реологии) грунта.

Деформация материала сваи от нагрузки  $P$  в грунте основания описывается криволинейными функциями  $\epsilon(x)$ . Упругое сжатие, производимое на упругом элементе сваи высотой  $dx$  от нагрузки  $P(x)$ , описывается формулой  $dS = \frac{P(x)}{EA} dx$ , где  $P(x)$  — функция усилия в свае в сечении  $x$ , зависящая от давления грунта в контакте со сваями и от внешней нагрузки  $P$ . Функция  $\epsilon(x)$  выявляется по результатам измерения деформаций  $\epsilon_i$  в сечениях сваи, например, методом тензометрирования. По значениям  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{max} = P/EA$  подбирается функция  $\epsilon(x)$  и по значению  $\epsilon(x) = 0$  находится рабочая высота свай  $h$ .

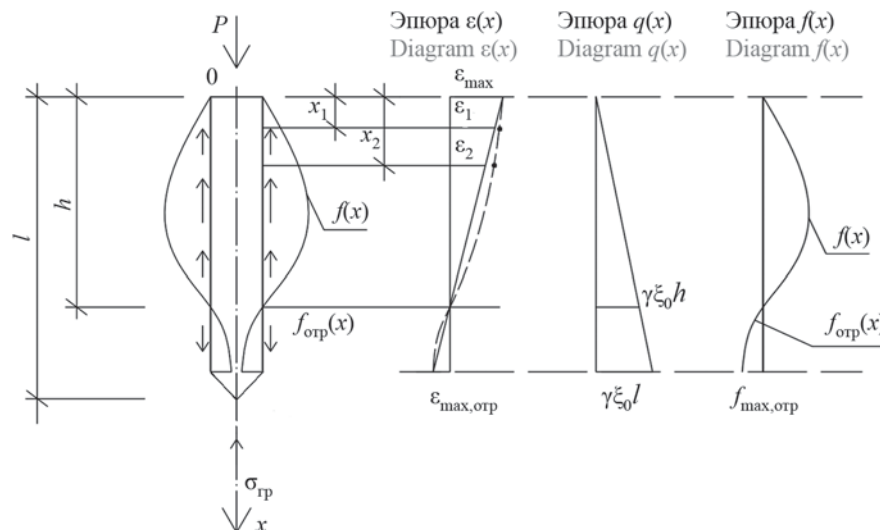


Рис. 3. Расчетная схема работы сваи в однородном грунте основания

Fig. 3. Design pattern of pile behavior in homogenous soil base

Предлагается, как видно из эпюры  $\varepsilon(x)$  на рис. 3, в запас надежности по критерию осадки сваи криволинейную эпюру  $\varepsilon(x)$  заменить прямолинейной, проходящей через две точки с координатами  $(0; \varepsilon_{\max})$  и  $(h; 0)$ , и представить ее в аналитическом виде:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{\max} \frac{h-x}{h} \text{ или}$$

$$\varepsilon(x) = \frac{P}{EA} \frac{h-x}{h}. \quad (3)$$

От нагрузки  $P$  на сваю под ее нижним концом возникает реакция в виде усилия  $\sigma_{\text{гр}}, A \leq RA$ , где  $R$  — расчетное сопротивление грунта основания, определяемое по табл. 7.1 СП 24.13330.2011. В результате действия этой реакции на нижнем конце сваи возникают отрицательные деформации  $\varepsilon_{\text{отр}}(x)$ . Из рис. 3 и эпюры  $\varepsilon(x)$  видно, что  $\varepsilon_{\text{отр}}(x) = \varepsilon_{\max, \text{отр}} \frac{x-h}{H-h}$ .

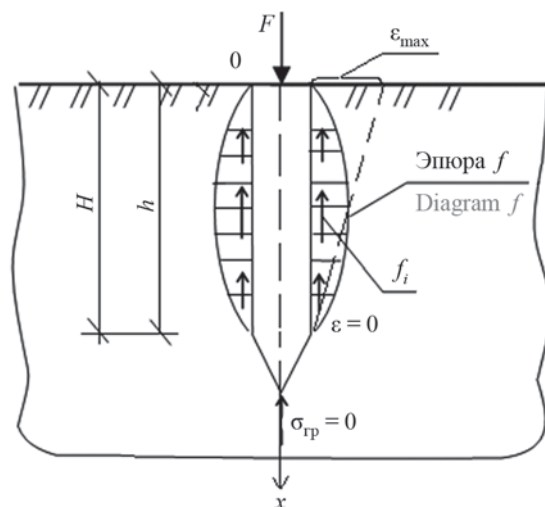
Так как  $\varepsilon_{\max, \text{отр}} = \varepsilon_{\max} \frac{H-h}{h}$ , то  $\varepsilon_{\text{отр}}(x) = \varepsilon_{\max} \times \frac{(H-h)(x-h)}{h(H-h)}$  или  $\varepsilon_{\text{отр}}(x) = \frac{P}{EA} \frac{x-h}{h}$ .

В статьях [16, 17] силы трения-сцепления  $f(x)$  зависят от микроперемещений (деформаций) материала сваи  $\varepsilon(x)$ , от нормального давления грунта  $q(x) = \gamma \xi_0 x$ , вида материала сваи, вида грунта и его состояния. По [16, 17] силы трения-сцепления определяются по формуле  $f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi$ , где  $\varphi$  — безразмерный коэффициент, определяемый из расчетной схемы сваи в грунте по рис. 4 при центральном сжатии при соблюдении значений  $h = H$  и  $\sigma_{\text{гр}} = 0$ .

На рис. 4 представлена предполагаемая свая с испытательной нагрузкой  $F$  для определения коэффициента  $\varphi$ , где  $f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi$ . Подставляя выражения (3) и  $q(x)$  в  $f(x)$  для сваи по рис. 3 и рассматривая

равновесие сил  $\Sigma x = 0$ , после сокращений получим:

$$\varphi = \frac{6EA}{u\gamma\xi_0 H^2}.$$

Рис. 4. Расчетная схема сваи для определения коэффициента  $\varphi$ Fig. 4. Design pattern of the pile to determine the  $\varphi$  coefficient

Для расчетной схемы по рис. 3 имеем:

$$f(x) = \frac{P}{EA} \frac{h-x}{h} \gamma \xi_0 x \varphi, \quad (4)$$

$$f_{\text{отр}}(x) = \frac{P}{EA} \frac{x-h}{h} \gamma \xi_0 x \varphi. \quad (5)$$

Формулы (4), (5) позволяют получить новое представление о возникновении и распределении сил трения-сцепления по боковой поверхности сваи. При-

рода возникновения сил трения сцепления  $f(x)$  и  $f_{отр}(x)$  характеризуется микроперемещениями (деформацией) ствола сваи, а не движением («срывом») сваи относительно грунта по боковой поверхности.

В настоящем исследовании предлагается использовать функции (4), (5) для описания сил трения-сцепления по боковой поверхности сваи при расчете составляющей осадки сваи от ее укорочения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетную схему работы висячей сваи в грунте основания, представленную на рис. 3, преобразуем в центрально-нагруженную стойку (рис. 5).

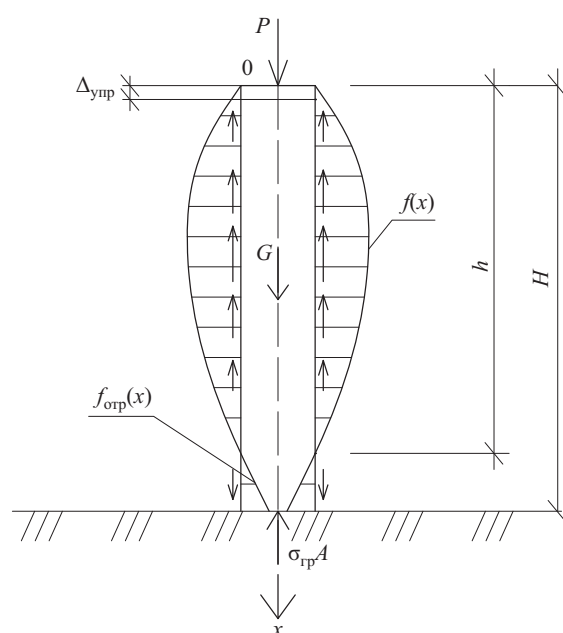


Рис. 5. Условная расчетная схема сваи в грунте в виде стойки при центральном сжатии

Fig. 5. Conditional design pattern of the pile in soil base in the form of a post under axial compression

Для определения составляющей осадки сваи за счет упругих деформаций сваи как части полной осадки используем принцип независимости действия сил в условиях упругих деформаций материала конструкции [18]. Свая-стойка по рис. 5 центрально нагружена силами  $P$ ,  $f(x)$ ,  $f_{отр}(x)$  и собственным весом  $G$ . В результате свая укорачивается на величину  $\Delta_{упр}$ , которую находим по принципу независимости действия всех сил с учетом их направления:

$$\Delta_{упр} = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_f$$

Из [18] известно, что  $\Delta_p = \frac{PH}{EA}$ ,  $\Delta_G = \frac{GH}{2EA}$ , где

$G = \gamma_c AH$ ,  $\gamma_c$  — объемный вес материала сваи;  $A$  — площадь поперечного сечения сваи;  $E$  — модуль упругости материала сваи.

В результате возникновения отрицательных сил трения-сцепления  $f_{отр}(x)$  на длине сваи  $H - h$ , вы-

званных сжатием сваи силой  $\sigma_{гр}A$  на нижнем конце сваи, произойдет ее укорочение за счет деформации материала сваи. Сжимающее усилие в произвольном

$$\text{сечении сваи } N(x) = u \int_h^x f_{отр}(x) dx.$$

$$\text{С учетом формулы (5) и } d\Delta_{f,отр}(x) = \frac{N(x)dx}{EA}$$

$$\text{найдем } \Delta_{f,отр} = \int_h^H \left[ \int_h^x \frac{uP\gamma_{\xi_0}\Phi(x-h)x}{(EA)^2(H-h)} dx \right] dx.$$

После интегрирования:

$$\Delta_{f,отр} = \frac{uP\gamma_{\xi_0}\Phi(H-h)^2(H+h)}{12(EA)^2}. \quad (6)$$

Найдем удлинение сваи на участке длины сваи  $H - h$  от нагрузки  $f(x)$  в верхней части сваи, используя выражение  $f(x)$  по (3). Расчетная схема этой части задачи показана на рис. 6. Обозначим перемещение удлинения сваи  $\Delta f = \Delta_{f,1} + \Delta_{f,2}$ , где  $\Delta_{f,1}$  — удлинение участка сваи длиной  $(H - h)$ ;  $\Delta_{f,2}$  — то же самое на участке сваи длиной  $h$  от нагрузки  $f(x)$ .

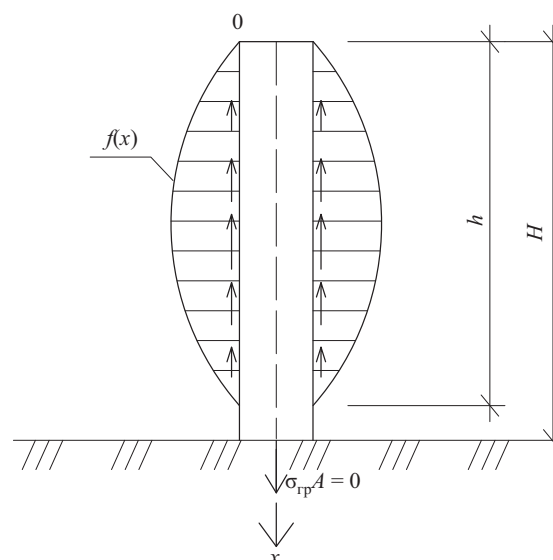


Рис. 6. Расчетная схема сваи с воздействием  $f(x)$

Fig. 6. Pile design pattern with the impact of  $f(x)$

Из рис. 6 видно, что по закону Гука:

$$\Delta_{f,1} = \int_h^H u f(x) \frac{H-h}{EA} dx.$$

После интегрирования получим:

$$\Delta_{f,1} = \frac{uP\gamma_{\xi_0}\Phi(H-h)h^2}{6(EA)^2}, \quad (7)$$

Исключая математические выкладки для выражений  $N(x) = u \int_0^x f(x) dx$  и  $\Delta_{f,2} = \int_0^h \frac{N(x)dx}{EA}$ , а также с учетом (4) получим:

$$\Delta_{f,2} = \frac{uP\gamma\xi_0\phi h^3}{12(EA)^2}. \quad (8)$$

Составляющая общей осадки сваи по (1) в виде  $\Delta s_c$  или  $\Delta_{упр}$  за счет упругой деформации материала сваи составит:

$$\Delta_{упр} = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_{f,1} - \Delta_{f,2}. \quad (9)$$

*Пример.* Найдем значения  $\Delta_{упр}$  сваи при следующих исходных данных:  $A = 0,09 \text{ м}^2$ ,  $u = 1,2 \text{ м}$ ,  $H = 10 \text{ м}$ ,  $h = 9 \text{ м}$ ,  $\gamma_c = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$ ,  $E = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $P = 5 \cdot 10^6 \text{ Н}$ ,  $\gamma_{тр} = 19 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$ ,  $\xi_0 = 0,1$ ,  $G = 20,7 \cdot 10^3 \text{ Н}$ ,  $\phi = \frac{6EA}{u\gamma\xi_0 H^2} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09}{1,2 \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^2} = 4,74 \cdot 10^4$ .

$$\Delta_p = \frac{PH}{EA} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 10}{0,09 \cdot 2 \cdot 10^{10}} = 28 \text{ мм};$$

$$\Delta_G = \frac{GH}{2EA} = \frac{20,7 \cdot 10^3 \cdot 10}{2 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} = 0,058 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} \Delta_{f,отр} &= \frac{uP\gamma\xi_0\phi(H-h)^2(H+h)}{12(EA)^2} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 4,74 \cdot 10^5 (10-9)^2 (10+9)}{12(2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09)^2} = \\ &= 0,26 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{f,1} &= \frac{uP\gamma\xi_0\phi(H-h)h^2}{6(EA)^2} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 4,74 \cdot 10^5 (10-9) \cdot 9^2}{6(2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09)^2} = 2,25 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{f,2} &= \frac{uP\gamma\xi_0\phi h^3}{12(EA)^2} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 4,74 \cdot 10^5 \cdot 9^3}{12(2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09)^2} = 10,1 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Общее укорочение сваи за счет упругой деформации (составляющая осадки сваи) составит:

$$\Delta_{упр} = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{отр} - \Delta_{f,отр} - \Delta_{f,1} - \Delta_{f,2} = 16 \text{ мм}.$$

Расчет по СП 24.13330.2011 при  $a = 4d = 1,2 \text{ м}$  дает:

$$\Delta s_c = \frac{P(l-a)}{EA} = \frac{5 \cdot 10^6 (10-1,2)}{2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} \rightarrow 24,4 \text{ мм}.$$

В рассмотренной задаче уточнение упругой составляющей осадки сваи привело к уменьшению осадки от укорочения сваи по сравнению с нормативным подходом.

Полученная расчетная формула (9) имеет перспективы дальнейшего развития в задачах вероятностного проектирования свайных фундаментов [19–22] и в задачах оценки и анализа риска при проектировании свайных фундаментов [23–25].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют различные методики, направленные на уточнение составляющей осадки сваи от упругого укорочения путем учета влияния трения грунта по боковой поверхности сваи. Учет отрицательных сил трения-сцепления по боковой поверхности сваи в рамках предложенного метода позволяет уменьшить значение осадки сваи от деформации укорочения.

В исследовании получена уточненная формула дополнительной осадки сваи  $\Delta s_c$  за счет упругого сжатия ствола сваи в однородном грунте основания при расчете свайных фундаментов по осадке. Предложенный метод расчета отличается дифференцированным подходом по всем силам, действующим на сваю, и в некоторых случаях может дать меньшее значение осадки  $\Delta s_c$ , что даст возможность получить экономический эффект.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баданин А.Н., Нурумбаева Л.М. Особенности расчета фундаментов по II группе предельных состояний // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 4 (9). С. 36–41.
2. Moayedi H., Kalantar B., Abdullahi M.M., Rashid A.S.A., Nazir R., Nguyen H. Determination of young elasticity modulus in bored piles through the global strain extensometer sensors and real-time monitoring data // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 15. P. 3060. DOI: 10.3390/app9153060
3. Al-Kinani A., Ahmed M.D. Comparison of single and group bored piles settlement based on field test and theoretical methods // Journal of Engineering. 2020.

Vol. 26. Issue 2. Pp. 144–158. DOI: 10.31026/j.eng.2020.02.11

4. Das B.M. Principles of foundation engineering: Seventh Edition. Cengage Learning, 2010. 794 p.

5. Fleming W.G.K. A new method for single pile settlement prediction and analysis // Geotechnique. 1992. Vol. 42. Issue 3. Pp. 411–425. DOI: 10.1680/geot.1992.42.3.411

6. Mission J.L.C., Kim H.J. Design charts for elastic pile shortening in the equivalent top-down load-settlement curve from a bidirectional load test // Computers and Geotechnics. 2011. Vol. 38. Issue 2. Pp. 167–177. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.11.001

7. Gwizdala K., Krasinski A. Bearing capacity of displacement piles in layered soils with highly diverse strength parameters // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Pp. 2–5.
8. Liang F., Song Z. BEM analysis of the interaction factor for vertically loaded dissimilar piles in saturated poroelastic soil // *Computers and Geotechnics*. 2014. Vol. 62. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.07.016
9. Wang L., Zhao X., Liu S. A study of differential foundation settlement of piled raft and its effect on the long-term vertical shortening of super-tall buildings // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2021. Vol. 30. Issue 4. DOI: 10.1002/tal.1832
10. Dai G., Gong W. Application of bi-directional static loading test to deep foundations // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 4. Issue 3. Pp. 269–275. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00269
11. Crispin J.J., Vardanega P.J., Mylonakis G. Prediction of pile settlement using simplified models // *Proceedings of the XVII ECSMGE*. 2019. Pp. 1–9. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0388
12. Mert M., Ozkan M.T. Settlement analysis of axially loaded bored piles: A case history // *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 2019. Vol. 13. No. 5. Pp. 394–401.
13. Теличенко В.И., Тер-Мартirosян З.Г. Взаимодействие свай большой длины с нелинейно-деформируемым массивом грунта // *Вестник МГСУ*. 2012. № 4. С. 22–27.
14. Буслов А.С., Бакулина А.А. Расчет перемещений горизонтально нагруженных свай с кольцевыми уширениями в пределах линейных деформаций основания // *Вестник МГСУ*. 2012. № 11. С. 38–44.
15. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Струнин П.В. Теоретические основы расчета фундаментов глубокого заложения — свай и барреты // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2014. № 2. С. 190–206.
16. Utkin V.S., Solov'yev S.A., Solov'yeva A.A. Friction pile bearing capacity based on the parabolic distribution of skin friction // *Building and Reconstruction*. 2020. Vol. 90. Issue 4. Pp. 65–72. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-65-72
17. Уткин В.С., Соловьев С.А. Разработка усовершенствованных моделей для расчета свай на несущую способность, осадку и надежность // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 6. С. 789–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.789-823
18. Dowling N.E., Katakam S., Narayanasamy R. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Boston, MA : Pearson, 2012. 954 p.
19. Wyjadłowski M., Bagińska I., Reiner J. Probabilistic assessment of pile capacity based on CPTu probing including random pile foundation depth // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196. P. 01058. DOI: 10.1051/mateconf/201819601058
20. Hamrouni A., Dias D., Sbartaï B. Probabilistic analysis of piled earth platform under concrete floor slab // *Soils and Foundations*. 2017. Vol. 57. Issue 5. Pp. 828–839. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.08.012
21. Bhattacharya S., Goda K. Probabilistic buckling analysis of axially loaded piles in liquefiable soils // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 45. Pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.10.004
22. Suits L.D., Sheahan T.C., Abu-Farsakh M.Y., Titi H.H. Probabilistic CPT method for estimating the ultimate capacity of friction piles // *Geotechnical Testing Journal*. 2007. Vol. 30. Issue 5. P. 100617. DOI: 10.1520/GTJ100617
23. Issa U.H., Ahmed A. On the quality of driven piles construction based on risk analysis // *International Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 12. Issue 2. Pp. 121–129.
24. Kumar M., Samui P. Reliability analysis of pile foundation using ELM and MARS // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019. Vol. 37. Issue 4. Pp. 3447–3457. DOI: 10.1007/s10706-018-00777-x
25. Dong W. A reliability study of a pile foundation design in soft soils // *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. 2018. Pp. 675–683. DOI: 10.1007/978-981-13-0131-5\_73

Поступила в редакцию 11 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 1 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 2 апреля 2021 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Владимир Сергеевич Уткин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства; Вологодский государственный университет (ВоГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 458724, Scopus: 16460902000, ResearcherID: AAJ-1570-2020, ORCID: 0000-0002-4990-1569; utkinvogtu@mail.ru;

Леонид Андреевич Сушев — аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства; Вологодский государственный университет (ВоГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; sushevla@vogu35.ru;

Сергей Александрович Соловьев — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; Вологодский государственный университет (ВоГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

## REFERENCES

1. Badanin A.N., Nurumbayeva L.M. Calculation of foundations for the group ii limit states and its features. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013; 4(9):36-41. (rus.).
2. Moayedi H., Kalantar B., Abdullahi M.M., Rashid A.S.A., Nazir R., Nguyen H. Determination of young elasticity modulus in bored piles through the global strain extensometer sensors and real-time monitoring data. *Applied Sciences*. 2019; 9(15):3060. DOI: 10.3390/app9153060
3. Al-Kinani A., Ahmed M.D. Comparison of single and group bored piles settlement based on field test and theoretical methods. *Journal of Engineering*. 2020; 26(2):144-158. DOI: 10.31026/j.eng.2020.02.11
4. Das B.M. *Principles of Foundation Engineering: Seventh Edition*. Cengage Learning, 2010; 794.
5. Fleming W.G.K. A new method for single pile settlement prediction and analysis. *Geotechnique*. 1992; 42(3):411-425. DOI: 10.1680/geot.1992.42.3.411
6. Mission J.L.C., Kim H.J. Design charts for elastic pile shortening in the equivalent top-down load-settlement curve from a bidirectional load test. *Computers and Geotechnics*. 2011; 38(2):167-177. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.11.001
7. Gwizdala K., Krasinski A. Bearing capacity of displacement piles in layered soils with highly diverse strength parameters. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013; 2-5.
8. Liang F., Song Z. BEM analysis of the interaction factor for vertically loaded dissimilar piles in saturated poroelastic soil. *Computers and Geotechnics*. 2014; 62:223-231. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.07.016
9. Wang L., Zhao X., Liu S. A study of differential foundation settlement of piled raft and its effect on the long-term vertical shortening of super-tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2021; 30(4). DOI: 10.1002/tal.1832
10. Dai G., Gong W. Application of bi-directional static loading test to deep foundations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012; 4(3):269-275. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00269
11. Crispin J.J., Vardanega P.J., Mylonakis G. Prediction of pile settlement using simplified models. *Proceedings of the XVII ECSMGE*. 2019; 1-9. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0388
12. Mert M., Ozkan M. T. Settlement analysis of axially loaded bored piles: a case history. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 2019; 13(5):394-401.
13. Telichenko V.I., Ter-Martirosyan Z.G. Interaction between long piles and the soil body exposed to non-linear deformations. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 4:22-27. (rus.).
14. Buslov A.S., Bakulina A.A. Calculation of displacements of laterally loaded piles with round caps within the limits of linear deformations of the base. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 11:38-44. (rus.).
15. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Strunin P.V. Theoretical bases of deep pile and barrette foundations. *Bulletin of Perm National Research Polytechnical University. Construction and Architecture*. 2014; 2:190-206. (rus.).
16. Utkin V.S., Solov'yev S.A., Solov'yeva A.A. Friction pile bearing capacity based on the parabolic distribution of skin friction. *Building and Reconstruction*. 2020; 90(4):65-72. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-65-72
17. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Development of improved models for pile load bearing capacity, settlement and reliability analysis. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(6):789-823. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.789-823 (rus.).
18. Dowling N.E., Katakam S., Narayanasamy R. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Boston, MA, Pearson, 2012. 954.
19. Wyjadłowski M., Bagińska I., Reiner J. Probabilistic assessment of pile capacity based on CPTu probing including random pile foundation depth. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:01058. DOI: 10.1051/mateconf/201819601058
20. Hamrouni A., Dias D., Sbartai B. Probabilistic analysis of piled earth platform under concrete floor slab. *Soils and Foundations*. 2017; 57(5):828-839. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.08.012
21. Bhattacharya S., Goda K. Probabilistic buckling analysis of axially loaded piles in liquefiable soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013; 45:13-24. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.10.004
22. Suits L.D., Sheahan T.C., Abu-Farsakh M.Y., Titi H.H. Probabilistic CPT method for estimating the ultimate capacity of friction piles. *Geotechnical Testing Journal*. 2007; 30(5):100617. DOI: 10.1520/GTJ100617
23. Issa U.H., Ahmed A. On the quality of driven piles construction based on risk analysis. *International Journal of Civil Engineering*. 2014; 12(2):121-129.
24. Kumar M., Samui P. Reliability analysis of pile foundation using ELM and MARS. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019; 37(4):3447-3457. DOI: 10.1007/s10706-018-00777-x
25. Dong W. A reliability study of a pile foundation design in soft soils. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. 2018; 675-683. DOI: 10.1007/978-981-13-0131-5\_73

*Received March 11, 2021.*

*Adopted in revised form on April 1, 2021.*

*Approved for publication on April 2, 2021.*

**B I O N O T E S:** **Vladimir S. Utkin** — Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 458724, Scopus: 16460902000, ResearcherID: AAJ-1570-2020, ORCID: 0000-0002-4990-1569; utkinvogtu@mail.ru;

**Leonid A. Sushev** — postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; sushevla@vogu35.ru;

**Sergey A. Solovev** — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

## Определение класса стали металлических конструкций по малогабаритным образцам

Ю.И. Густов, И.О. Махов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Приведены результаты обследования стальных конструкций, по которым установлены прочностные классы конструкционных сталей. Поставленная задача решена путем определения химического состава металлоконструкций в лабораторных условиях и механических характеристик натурными испытаниями стальных конструкций с последующим расчетным преобразованием показателя твердости HB в значение временного сопротивления разрыву  $\sigma_v$ .

**Материалы и методы.** Прочностные показатели металлических конструкций исследованы неразрушающим экспресс-методом посредством переносного твердомера динамического принципа действия. Для расчетного выявления временного сопротивления разрыву  $\sigma_v$  принят среднестатистический коэффициент относительного удлинения  $k_\delta$ . По его значению установлены показатели относительного удлинения и сужения, а также предел текучести металла. По вычисленным стандартным показателям пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и прочности ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_T$ ) составлено уравнение комплексного критерия C. С его учетом рассчитаны равномерное относительное удлинение  $\delta_p$  и поперечное сужение  $\psi_p$ , которые использованы для оценки сопротивлений разрыву ( $S_k$  — истинное сопротивление разрыву) и усталости ( $\sigma_{-1}$  — предел выносливости при изгибе;  $\tau_{-1}$  — предел выносливости при кручении). Методом рентгеновской флуоресценции выявлен химический состав малогабаритных образцов в виде металлической стружки. Дополнительно химический состав стали проконтролирован при помощи растрового сканирующего микроскопа с приставкой для определения химического состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

**Результаты.** Предложенный метод исследования дает возможность проведения натурных испытаний металлических конструкций и снижает трудоемкость отбора и доставки образцов для лабораторных исследований. Полученные результаты по всем методикам коррелируются с исходными данными (проектная документация по объекту обследования).

**Выводы.** Комплексный метод отбора мелкостружечных образцов и непосредственного измерения твердости на реконструированном объекте позволяет выявить химический состав металлоконструкций, класс конструкционной стали, показатели ее механических свойств с исключением трудозатрат по отбору крупногабаритных образцов и минимизацией повреждений элементов обследуемых конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механические свойства металла, химический состав металла, малогабаритные металлические образцы, обследование строительных конструкций, прочностные классы, твердость стали, коэффициенты пластичности стали

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Густов Ю.И., Махов И.О. Определение класса стали металлических конструкций по малогабаритным образцам // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 340–346. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.340-346

## Determination of the class of steel by small samples

Yuri I. Gustov, Igor O. Makhov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The data of the results of the inspection of steel structures are given, based on the analysis of which strength classes of structural steels are established. The goal has been solved by determining the chemical composition of metal structures and full-scale tests of the mechanical characteristics of steel structures, followed by a calculated conversion of the hardness index HB to the value of temporary tensile strength  $\sigma_v$ .

**Materials and methods.** Strength indicators of metal structures are determined by non-destructive express method by means of a portable hardness tester of the dynamic principle of action. For the calculated determination of the breaking strength  $\sigma_v$ , adopted the average lengthening coefficient  $k_\delta$ . By its value, the indicators of elongation and contraction are established, as well as the yield strength of the metal. Based on the calculated standard indicators of plasticity ( $\delta$ ,  $\psi$ ) and strength ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_T$ ), the complex criterion C equation is compiled. Using it, calculated the uniform elongation  $\delta_p$  and the transverse narrowing  $\psi_p$ , which were used to assess the tensile strength ( $S_v$ ,  $S_k$ ) and fatigue ( $\sigma_{-1}$ ,  $\tau_{-1}$ ).

The chemical composition of small-sized samples in the form of metal shavings was determined by x-ray fluorescence. Additionally, the chemical composition of the steel was monitored using a scanning microscope with an attachment for determining the chemical composition by energy dispersive x-ray spectroscopy.

**Results.** The proposed research method makes it possible to conduct full-scale tests of metal structures and reduces the complexity of the selection and delivery of samples for laboratory research. The results obtained by both methods are correlated with the source data (design documentation for the object of the survey).

**Conclusions.** An integrated method of sampling and direct measurement of hardness on site allows one to determine the chemical composition of metal structures, the grade and type of structural steel and its mechanical properties. At the same time, the scientific novelty is the given technique as a whole, which is characterized by a significant reduction in labor costs and minimization of damage to the objects under study.

**KEYWORDS:** mechanical properties of metal, chemical composition of metal, small-sized metal samples, inspection of building structures, strength classes, hardness of steel, coefficients of plasticity of steel

**FOR CITATION:** Gustov Yu.I., Makhov I.O. Determination of the class of steel by small samples. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):340-346. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.340-346 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Основополагающим вопросом, решаемым в процессе обследовательских работ, является вопрос о несущей способности конструкций [1]. Несущую способность конструкций невозможно определить без знания прочностных характеристик материала конструкций [2, 3].

Установить прочностные характеристики железобетонных конструкций можно прямыми и косвенными методами испытаний, такими как метод отрыва со скалыванием, ударно-импульсный, ультразвуковой и т.д. В то же время согласно нормативно-технической документации определение механических характеристик стальных конструкций осуществляется только путем отбора полноразмерных образцов с последующими лабораторными испытаниями на разрыв [4–6].

Необходимо отметить, что при проведении работ по обследованию конструкций зачастую отбор образцов не представляется возможным или связан со значительными трудозатратами по отбору образцов и доставки их до лаборатории, в частности, из-за удаленности объекта от лаборатории.

Существующие методики измерения твердости металлов [7–9] позволяют расчетным путем преобразовать полученные значения твердости в значения временного сопротивления разрыву [10–12]. С помощью выявления пластических показателей [13–15] высчитывается истинное сопротивление разрыву, а также пределы выносливости на изгиб и кручение [16, 17].

В статье изложен способ определения механических характеристик стальных конструкций и установления марки стали путем проведения натурных испытаний на объекте и отбора малых образцов в виде металлической стружки. Разработанная методика реализована при обследовании сооружения с несущим металлическим каркасом.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основная цель обследования стальных конструкций объекта — установление прочностных классов сталей несущих конструктивных элементов. При этом решались следующие задачи:

- определение химического состава несущих металлических конструкций;

- измерение твердости несущих металлических конструкций;

- расчетное определение прочностных показателей несущих металлических конструкций.

Сложность выполнения работ заключалась в невозможности отбора полноразмерных образцов с последующими лабораторными испытаниями на разрыв ввиду высоких напряжений в основных несущих конструкциях, установленных по предварительному поверочному расчету. Дополнительно к этому отбор образцов усложнялся вследствие значительных толщин основных несущих конструкций, достигающих 36 мм. Из-за удаленности объекта от основного базового месторасположения обследовательской организации (его нахождения в другом регионе), при условии ограниченности в ресурсах и оборудовании, а также сложностях доставки полноразмерных образцов до лаборатории было принято решение о проведении натурных измерений и отборе малых образцов в виде металлической стружки.

Прочностные характеристики металлических конструкций устанавливались переносным твердомером типа ТЭМП-2, предназначенным для неразрушающего экспрессного измерения твердости сталей, сплавов и их сварных соединений. Принцип измерения твердости прибора — динамический — по соотношению скоростей падения и отскока ударника, преобразуемым прибором в числа твердости выбранной шкалы [7–9].

По результатам визуального обследования металлических конструкций и анализа исходных данных, в том числе проектной документации, выявлены типовые конструкции с одинаковыми прочностными характеристиками. Для каждого типа конструкций случайным образом выбрано не менее трех конструктивных элементов. Поскольку обследуемые металлические элементы полностью покрыты огнезащитным составом, определить по результатам предварительного обследования наихудшие участки не представлялось возможным, в связи с чем на каждом элементе отбирался случайный участок, доступный для инструментального обследования.

Поверхность металлических конструкций защищалась механическим и ручным способами, после чего на подготовленной поверхности проводилась серия из десяти испытаний, среднее значение которых принималось в расчет. При этом производилась

отбраковка выбросов статистическими методами, а коэффициент вариации для всех испытаний в серии задавался не превышающим 10 %. Перед измерением прибор был откалиброван в помещении расположения конструкций при помощи эталона с числом твердости 425 НВ с целью исключения погрешности из-за разницы температурно-влажностного режима. Все испытания осуществлялись в соответствии с ГОСТ 9012-59\*.

Величина твердости НВ служила исходным эмпирическим показателем для расчетного определения временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  посредством среднестатистического коэффициента относительного удлинения  $k_\delta = 0,346$ , вычисленного для сталей по данным [10–12]. Коэффициент  $k_\delta$  выражен через относительное удлинение  $\delta$  в виде:

$$k_\delta = (1 - \delta)^{1/\delta}. \quad (1)$$

При условии принятого  $\delta = 0,27$  (27 %),  $k_\delta = 0,312$ , с расхождением от среднестатистического значения на 10,9 %. При нормируемом удлинении для стали 09Г2  $\delta = 0,21$  (21 %) [2]  $k_\delta = 0,325$  с расхождением от среднестатистического значения на 4,2 %.

Относительное сужение принято равным  $\psi = 0,54$  (54 %), при котором коэффициент  $k_\psi$  показывает обоснованность принятого относительного сужения:

$$k_\psi = (1 - \psi)^{1/\psi} = k_\delta / (1 + k_\delta). \quad (2)$$

Для определения временного сопротивления разрыву стали применяется зависимость:

$$\sigma_b = 9,81 k_\delta \text{НВ}, \text{ МПа}. \quad (3)$$

При этом оценка предела текучести может быть произведена по формуле:

$$\sigma_T = \sigma_b / (1 + k_\psi)^{0,5}, \text{ МПа}. \quad (4)$$

На основе принятых величин составляется уравнение относительных прочностных и пластических показателей вида [13–15]:

$$\sigma_T / \sigma_b + \delta / \psi = C = [(1 + \delta_c) / (1 + \delta_p)]^{1/\psi}, \quad (5)$$

где  $\delta_p$ ,  $\delta_c$  — соответственно равномерное и сосредоточенное относительные удлинения, вычисляемые по формулам:

$$\delta_p = [(1 + \delta) / C^\psi]^{0,5} - 1, \quad \delta_c = (\delta - \delta_p) / (1 + \delta_p). \quad (6)$$

Истинное сопротивление разрыву определяется по зависимости [16, 17]:

$$S_k = \sigma_b(1 + \psi), \text{ МПа}. \quad (7)$$

Предел выносливости при изгибе вычисляется по формуле:

$$\sigma_{-1} = k_\delta S_k, \text{ МПа}. \quad (8)$$

Предел выносливости при кручении рассчитывается следующим образом:

$$\tau_{-1} = (k_\delta + k_\psi) \sigma_{-1}, \text{ МПа}. \quad (9)$$

Для выявления химического состава материала металлических конструкций на объекте были отобраны образцы из элементов конструкций путем высверливания стружки аккумуляторными дрелями на участках элементов стальных конструкций, защищенных от огнезащитного покрытия [18–21]. Образцы отбирались на участках, предварительно испытанных с помощью переносного твердомера. Пример подготовки поверхности металлического элемента для испытаний твердомером и отбора образцов представлен на рисунке. Каждый отобранный образец упаковывался в герметичную стерильную пластиковую емкость, после чего емкость соответствующим образом маркировалась.

Малые габариты образцов позволили упростить и удешевить их транспортировку из региона расположения объекта обследования к базовому месторасположению обследовательской организации. Замаркированные образцы были доставлены в лабораторию для последующих испытаний.



Поверхность стального элемента № 1 после зачистки поверхности, проведения натурных испытаний твердомером и отбора образца

Surface of steel element No. 1 after surface cleaning, full-scale testing with a hardness tester and sampling

Химический состав отобранных образцов определялся в лабораторных условиях методом рентгеновской флуоресценции по ГОСТ Р 55410-2013. Лабораторным испытаниям подвергалась серия образцов, отобранных из несущих конструкций реконструируемого объекта.

Дополнительно химический состав стали контролировался при помощи растрового сканирующего микроскопа с приставкой для установления химического состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС).

Сущность метода заключается в качественном и количественном определении химических элементов в образце при помощи регистрации энергетических спектров от характеристического рентгеновского излучения атомов изучаемого образца.

В лабораторных условиях метод ЭРС реализовывался с помощью микроскопа FEI Quanta 200 с приставкой для определения химического анализа Apollo 40.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний элементов конструкций приведены в табл. 1.

В итоге выявления твердости стальных элементов был установлен класс стали, соответствующий С255.

Результаты определения химического состава образцов представлены в табл. 2.

Табл. 1. Показатели механических свойств элементов

Table 1. Indicators of mechanical properties of elements

| Конструктивный элемент<br>Structural element | HB<br>Brinell<br>hardness | $\sigma_b$ , МПа<br>MPa | $\sigma_T$ , МПа<br>MPa | $k_\delta$ | $k_\psi$ | $S_k$ , МПа<br>MPa | $\sigma_{-1}$ , МПа<br>MPa | $\tau_{-1}$ , МПа<br>MPa |
|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----------|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| Несущий элемент № 1<br>Bearing element No. 1 | 91,6                      | 284,87                  | 248,80                  | 0,31       | 0,24     | 443,99             | 138,08                     | 75,70                    |
| Несущий элемент № 2<br>Bearing element No. 2 | 95,9                      | 298,74                  | 260,86                  | 0,31       | 0,24     | 465,61             | 145,04                     | 79,63                    |
| Несущий элемент № 3<br>Bearing element No. 3 | 97,1                      | 302,61                  | 264,23                  | 0,31       | 0,24     | 471,65             | 146,99                     | 80,74                    |
| Несущий элемент № 4<br>Bearing element No. 4 | 100,6                     | 313,94                  | 274,08                  | 0,31       | 0,24     | 489,31             | 152,70                     | 83,97                    |
| Среднее значение<br>Mean value               | 96,3                      | 300,04                  | 261,99                  | 0,31       | 0,24     | 467,64             | 145,70                     | 80,01                    |

Табл. 2. Химический состав опытных образцов

Table 2. Chemical composition of test samples

| Химический<br>элемент<br>Chemical<br>element | Содержание, % / Content, %                   |                                              |                                              |                                              |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                              | Несущий элемент № 1<br>Bearing element No. 1 | Несущий элемент № 2<br>Bearing element No. 2 | Несущий элемент № 3<br>Bearing element No. 3 | Несущий элемент № 4<br>Bearing element No. 4 |
| Fe                                           | 98,463                                       | 98,576                                       | 98,624                                       | 98,647                                       |
| Mn                                           | 0,834                                        | 0,887                                        | 0,843                                        | 0,975                                        |
| Si                                           | 0,466                                        | 0,311                                        | 0,291                                        | 0,252                                        |
| C                                            | 0,113                                        | 0,103                                        | 0,119                                        | 0,010                                        |
| Cu                                           | 0,022                                        | 0,021                                        | 0,015                                        | 0,020                                        |
| S                                            | 0,027                                        | 0,033                                        | 0,028                                        | 0,028                                        |
| P                                            | 0,022                                        | 0,019                                        | 0,026                                        | 0,027                                        |
| Cr                                           | 0,011                                        | 0,010                                        | 0,010                                        | 0,012                                        |
| Al                                           | 0,030                                        | 0,030                                        | 0,022                                        | 0,024                                        |
| Ni                                           | 0,011                                        | 0,009                                        | 0,019                                        | 0,004                                        |
| V                                            | 0,001                                        | 0,001                                        | 0,002                                        | 0,001                                        |

По результатам проведенных лабораторных исследований химический состав образцов в соответствии с ГОСТ 27772-2015 можно идентифицировать как сталь 255, что коррелируется с данными, полученными по итогам определения твердости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с результатами исследования можно сформулировать следующие основные выводы:

- натурные исследования по определению прочностных характеристик металлических конструкций позволили идентифицировать сталь со средней твердостью 96,3 HB и временным сопротивлением разрыву 284,87–313,94 МПа как сталь класса С255;

- отбор малогабаритных образцов в виде металлической стружки дал возможность установить химический состав стали, по итогам анализа которого марку стали можно принять как С255;

- полученные данные по результатам натурных и лабораторных исследований коррелируются между собой и позволяют определить прочностные характеристики металлических конструкций обследуемого объекта. При этом они совпадают с данными, приведенными в проектной документации по объекту;

- применение методики исследования металлов на основе натурных и лабораторных испытаний по малогабаритным образцам дает возможность идентифицировать металлические материалы обследуемых объектов с существенным уменьше-

нием трудозатрат и с минимизацией повреждений металлических конструкций реконструируемых сооружений.

Таким образом, можно сделать общий вывод: комплексный метод отбора мелкостружечных образцов и непосредственного измерения твердости на ре-

конструированном объекте позволяет определить химический состав металлоконструкций, класс конструкционной стали, показатели ее механических свойств с исключением трудозатрат по отбору крупногабаритных образцов и минимизацией повреждений элементов обследуемых конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подъяпольский С.С., Бессонов Г.Б., Беляев Л.А., Постникова Т.М. Реставрация памятников архитектуры. М. : Стройиздат, 2000. 267 с.
2. Густов Ю.И., Пятницкий А.А., Махов И.О. Исследование механических свойств и структуры металлов реставрируемых строительных объектов // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 90–97. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.90-97
3. Аллаттуф Х.Л. Оценка работоспособности трубопроводных сталей по энергетическим критериям // Механизация строительства. 2014. № 6 (840). С. 46–48.
4. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of metallic materials. Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. 239 p.
5. Matt K. Zeitschrift für Metallkunde. Riederer-Verlag, 1962. Vol. 53.
6. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. М. : Металлургия, 1981. 648 с.
7. Гудков А.А., Славский Ю.И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. М. : Металлургия, 1982. 167 с.
8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М. : Машиностроение, 1974. 367 с.
9. Radzimovsky G. Stress distribution and strength condition of two rolling cylinders pressed together // University of Illinois Bulletin series No. 408. 1953. Vol. 50. No. 44. 40 p.
10. Гуляев А.П. Металловедение. М. : Металлургия, 1986. 544 с.
11. Dubov A., Kolokolnikov S. Quality assurance of welded joints in power engineering by the metal magnetic memory method // Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry : Proceeding of the IIW International Conference. 2008. Pp. 709–714.
12. Колокольников С.М., Дубов А.А. Определение механических свойств металла сварных швов по параметрам твердости в зонах концентрации напряжений, выявленных методом магнитной памяти металла // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металлов : сб. докл. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. М., 2013. С. 66–76.
13. Густов Ю.И., Густов Д.Ю. Исследование взаимосвязи механических свойств металлических материалов // Теоретические основы строительства : докл. VII польско-русского семинара. М. : Изд-во АСВ, 1998. С. 225–228.
14. Густов Ю.И., Аллаттуф Х.Л. Исследование взаимосвязи коэффициентов пластичности и предела текучести сталей стандартных категорий прочности // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 22–26. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.7.22-26
15. Густов Ю.И., Куртенок Н.П., Вороница И.В., Аллаттуф Х.Л. Соотношения чисел твердости в расчетах на статическую и циклическую прочность конструкционных сталей // Вестник МГСУ. 2013. № 1. С. 72–78. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.1.72-78
16. Ivanova V.S. Fracture and strength of solids. Xian, 1994. P. 18.
17. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М. : Наука, 1994. 383 с.
18. Мойсейчик Е.А., Шафрай С.Д. Деформационное теплообразование в сдвигаемых пластинах с конструктивными дефектами // Вестник МГСУ. 2013. № 9. С. 7–15. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.7-15
19. Pasternak H., Müller L. Untersuchung des thermoplastischen Verhaltens verschiedener Baustoffe mit Hilfe der Thermovision // Bauingenieur. 2003. Vol. 78. Pp. 221–230.
20. Шафрай С.Д., Сергеев А.В. Синергетический подход к описанию квазихрупкого разрушения стальных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1990. № 8. С. 11–15.
21. Мойсейчик Е.А., Шафрай С.Д. О деформационном теплообразовании в элементах стальных строительных конструкций из низкоуглеродистой стали // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 2012. № 7–8 (643–644). С. 101–109.

Поступила в редакцию 31 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 15 марта 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юрий Иванович Густов** — профессор кафедры механизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 306939; Scopus: 36885457800; gustovui@mgsu.ru;

**Игорь Олегович Махов** — преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mahovio@ya.ru.

## REFERENCES

1. Podyapolsky S.S., Bessonov G.B., Belyaev L.A., Postnikova T.M. *Restoration of Architectural Monuments*. Moscow, Stroyizdat, 2000; 267. (rus.).
2. Gustov Y.I., Pyatnitskiy A.A., Makhov I.O. Research into mechanical properties and structure of metals as part of restored construction facilities. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 11:90-97. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.90-97 (rus.).
3. Allattuf H.L. Assessment of performance of pipeline steels on energy criteria. *Mechanization of Construction*. 2014; 6(840):46-48. (rus.).
4. Klesnil M., Lukas P. *Fatigue of metallic materials*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1980; 239.
5. Matt K. *Zeitschrift für Metallkunde*. Riederer-Verlag, 1962; 53.
6. Tylkin M.A. *Reference thermist repair service*. Moscow, Metallurgiya, 1981; 648. (rus.).
7. Gudkov A.A., Slavsky Yu.I. *Methods for measuring the hardness of metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya, 1982; 168. (rus.).
8. Friedman Ya.B. *The mechanical properties of metals. Part 2. Mechanical tests. Structural strength*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1974; 367. (rus.).
9. Radzimovsky G. Stress distribution and strength condition of two rolling cylinders pressed together. *University of Illinois Bulletin series*. 1953; 408; 50:44.
10. Gulyaev A.P. *Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya, 1986; 544. (rus.).
11. Dubov A., Kolokolnikov S. Quality assurance of welded joints in power engineering by the metal magnetic memory method. *Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry : Proceeding of the IIW International Conference*. 2008; 709-714.
12. Kolokolnikov S.M., Dubov A.A. Determination of mechanical properties of weld metal by hardness parameters in stress concentration zones detected by metal magnetic memory method. *Diagnostics of Equipment and Structures Using Metal Magnetic Memory : Collection of Reports 7th International Scientific and Technical Conference*. Moscow, 2013; 66-76. (rus.).
13. Gustov Yu.I., Gustov D.Yu. Interrelation investigation of mechanical properties of metal materials. *Theoretical Basis of Construction : Reports of the 7th Polish-Russian Workshop*. Moscow, Publishing house ASV, 1998; 225-228. (rus.).
14. Gustov Yu.I., Allattuf H.L. Study of interdependence between ductility factors and yield limits for steels of standard strength grades. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 7:22-26. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.7.22-26 (rus.).
15. Gustov Y.I., Kurtenok N.P., Voronina I.V., Allattouf H.L. Ratios of hardness numbers in calculations of static and cyclical strength of structural types of steels. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 1:72-78. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.1.72-78 (rus.).
16. Ivanova V.S. *Fracture and strength of solids*. Xian, 1994; 18.
17. Ivanova V.S., Balakin A.S., Bunin I.Zh., Oksoegov A.A. *Synergetics and fractals in material science*. Moscow, Nauka, 1994; 383. (rus.).
18. Moyseychik E.A., Shafray S.D. Deformation-induced heating of shifted plates having structural defects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 9:7-15. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.7-15 (rus.).
19. Pasternak H., Müller L. Untersuchung des thermoplastischen Verhaltens verschiedener Baustoffe mit Hilfe der Thermovision. *Bauingenieur*. 2003; 78:221-230.
20. Shafray S.D., Sergeyev A.V. Synergetic approach to the description of quasi-brittle fracture of steel structures. *News of Institutions of Higher Education. Construction*. 1990; 8:11-15. (rus.).
21. Moyseychik E.A., Shafray S.D. On deformation-induced heat formation in steel structures made of low-carbon steel. *News of Institutions of Higher Education. Construction*. 2012; 7-8(643-644):101-109. (rus.).

Received January 31, 2020.

Adopted in revised form on February 18, 2021.

Approved for publication on March 15, 2021.

**B I O N O T E S:** **Yuri I. Gustov** — Professor of the Department of Construction Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 306939; Scopus: 36885457800; gustovui@mgsu.ru;

**Igor O. Makhov** — Lecturer of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mahovio@ya.ru.

## Подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, применяемых в строительстве

А.А. Аскадский<sup>1,2</sup>, С.В. Мацевич<sup>3</sup>, Т.А. Мацевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Впервые предложены модель и принцип построения соответствующей компьютерной программы для подбора структурных фрагментов полимерных сеток, обладающих заданным интервалом ряда физических характеристик. К ним относятся плотность, температура начала интенсивной термической деструкции, теплопроводность, водопроницаемость, коэффициент оптической чувствительности по напряжению. Цель исследования — разработка модели для написания компьютерной программы, позволяющей осуществлять подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, обладающих заданными интервалами физических характеристик. Для полимеров, используемых в строительной индустрии, наиболее важными являются температура стеклования и коэффициент оптической чувствительности по напряжению, плотность, водопроницаемость, теплопроводность.

**Материалы и методы.** Повторяющийся фрагмент сетки подбирается из мельчайших базовых фрагментов, которые соединяются друг с другом с помощью управляющей матрицы взаимодействий. Матрица содержит метки, позволяющие управлять взаимодействием углерода с тремя атомами углерода, с атомом углерода и двумя атомами азота, с двумя атомами углерода и одним атомом кислорода, с двумя атомами углерода и одним атомом азота, с четырьмя атомами углерода. Также имеются метки, управляющие взаимодействием атомов углерода, входящих в ароматические циклы, с двумя атомами углерода и одним атомом кислорода, с четырьмя атомами углерода, с четырьмя атомами азота, с двумя атомами углерода и одним атомом серы, тремя атомами кислорода. Это дает возможность проводить подбор огромного количества сетчатых полимеров.

**Результаты.** Представлено возможное химическое строение 14 узлов полимерной сетки, проведены соответствующие расчеты, показывающие адекватность модели и принципа построения компьютерной программы. Использованы структуры шести узлов полимерной сетки и рассчитаны следующие физические характеристики полученных сеток: плотность, температура начала интенсивной термической деструкции, водопроницаемость, теплопроводность, коэффициент оптической чувствительности по напряжению. Эти характеристики важны для изготовления строительных материалов.

**Выводы.** Результаты работы позволяют осуществить написание реальной компьютерной программы для подбора повторяющихся фрагментов полимерных сеток, обладающих заданным интервалом ряда важных физических характеристик сетчатых полимеров.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полимерные сетки, плотность, коэффициент оптической чувствительности по напряжению, температура начала интенсивной термодеструкции, водопроницаемость, теплопроводность, параметр растворимости, поверхностная энергия, теплоемкость

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Аскадский А.А., Мацевич С.В., Мацевич Т.А. Подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, применяемых в строительстве // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 347–359. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.347-359

## Selection of structural elements of cross-linked polymers used in construction

Andrey A. Askadskii<sup>1,2</sup>, Sergey V. Matseevich<sup>3</sup>, Tat'yana A. Matseevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS); Moscow, Russian Federation;

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

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** For the first time, a model and a principle for constructing an appropriate computer program for the selection of polymer networks with a given interval of a number of physical characteristics are proposed. These characteristics include density, the temperature of the onset of intense thermal degradation, thermal conductivity, water permeability, and the stress-optical coefficient. As an example, 16 smallest base fragments are given, which, when attached to each other, allow the se-

lection of structural fragments of repeating fragments of polymers of the following classes: polyolefins, vinyl polymers, polystyrene, polyamides, polyethers and polyesters, polycarbonates, polyetherketones, polyimides, polysulfides, polysulfones, silicone polymers, polyurethanes, cellulose derivatives, methacrylic polymers, etc. The purpose of the study is to develop a model for writing a computer program that allows the selection of structural fragments of network polymers possessing specified intervals of physical characteristics. For polymers used in the construction industry, the most important are the glass transition temperature, the stress-optical coefficient, density, water permeability, and thermal conductivity.

**Materials and methods.** A repeating fragment of the network is selected from the smallest basic fragments, which are connected to each other using a control matrix of interactions. The matrix contains labels that allow you to control the interaction of carbon with three carbon atoms, with a carbon atom and two nitrogen atoms, with two carbon atoms and one oxygen atom, with two carbon atoms and one nitrogen atom, with four carbon atoms. There are also labels that control the interaction of carbon atoms included in the aromatic cycles with two carbon atoms and one oxygen atom, with four carbon atoms, with four nitrogen atoms, with two carbon atoms and one sulfur atom, and three oxygen atoms. This makes it possible to select a huge amount of cross-linked polymer.

**Results.** As an example, the possible chemical structure of 14 cross-linked nodes of the polymer network is presented and the corresponding calculations are carried out, showing the adequacy of the model and the principle of constructing a computer program. The structures of the five cross-linked nodes of polymer network were used and the following physical characteristics of the resulting networks were calculated: density, the temperature of the onset of intense thermal degradation, water permeability, thermal conductivity, and the stress-optical coefficient. All these characteristics are important for the manufacture of building materials.

**Conclusions.** The results of the work allow us to write a real computer program for the selection of repeating fragments of polymer networks that have a given interval of a number of important physical characteristics of network polymers. Among these characteristics are not only those listed above, but also other characteristics, such as glass transition temperature, Hildebrand solubility parameter, surface energy, heat capacity, intermolecular interaction energy, permittivity, etc.

**KEYWORDS:** polymer networks, density, stress-optical coefficient, degradation temperature, water permeability, thermal conductivity, solubility parameter, surface energy, heat capacity

**FOR CITATION:** Askadskii A.A., Matseevich S.V., Matseevich T.A. Selection of structural elements of cross-linked polymers used in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):347-359. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.347-359 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование — мощное средство изучения свойств различных материалов, в частности, применяемых в строительстве. Разработка и совершенствование методов компьютерного моделирования для установления связей между химическим строением и физическими свойствами материалов является актуальной научной задачей<sup>1</sup> [1–14]. В работе [15] рассмотрена динамика релаксации полимерной сетки, моделируемой фрактальным кактусом. Найдено, что для малых и средних гидродинамических взаимодействий релаксационные величины не подчиняются степенному закону поведения. Теоретические выводы относительно масштабирования в промежуточной области релаксационных величин подтверждаются экспериментальными данными из независимых источников.

Проведено теоретическое исследование влияния петель полимерных цепей на модуль упругости [16]. Рассмотренная модель позволяет количественно описать упругость полимерной сетки с конечными размерами петель и деформацию ее отдельных нитей. Рассчитано также влияние первичных петель и циклических дефектов произвольной концентрации на упругость такой сетки. В труде [17] изложена теория гибких полимерных сеток. Основное внимание уделено упругости и влиянию неоднородности структуры.

<sup>1</sup> Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров / отв. ред. В.А. Иванов, А.Л. Рабинович, А.Р. Хохлов. М. : ЛИБРОКОМ, 2009. С. 662.

Получены новые самовосстанавливающиеся полиуретаны на водной основе [18]. Химическая структура таких полиуретанов содержала алифатические дисульфидные связи. Наличие сильных водородных связей, благодаря которым образуется физическая сетка, приводит к получению материалов с повышенными модулями упругости.

Исследована роль наноразмерных неоднородностей на удельную ударную вязкость эпоксидных сеток [19]. Использована эпоксидная смола на основе диглицидилового эфира бисфенола А, а в качестве отвердителя — циклоалифатический диамин или диамин, полученный на основе полипропиленгликоля. Измерения проводили, начиная с температуры –100 °С, до температуры окружающей среды. Высокая ударная вязкость достигается в сетках, полученных из сополимеров, в которых уменьшение напряжения когезионной зоны компенсируется достаточно большим увеличением смещения полости в вершине трещины.

В публикации [20] получены полимерные сетки на основе дисульфидсодержащих полисилоксановых эластомеров, в которых в качестве удлинителя цепи и сшивающего агента использовались компоненты, содержащие мочевиные группы. Отличительная особенность таких систем заключается в том, что они легко повторно перерабатываются, сохраняя высокое значение деформации при разрыве (до 780 %).

Проблема предсказания физических свойств сетчатых полимеров на основе их химического строения детально рассматривалась в монографии [21]. В работах [22, 23] такой подход отсутствует, хотя

делаются поправки к способам расчета свойств линейных полимеров, позволяющие оценивать величины  $T_g$  сетчатых полимеров.

Примером реальных полимерных материалов, полученных по результатам компьютерного моделирования, являются градиентные материалы на основе полиуретанизоциануратов; температура стеклования, модуль упругости и все другие физические свойства плавно меняются в пределах одного и того же материала. Для строительной отрасли наибольший интерес представляет коэффициент оптической чувствительности по напряжению, который используется в методе фотоупругости. В этом методе оце-

нивают деформационно-напряженное состояние сложных строительных конструкций путем сборки моделей из полимерных материалов, их нагружения и измерения двойного лучепреломления. Такие материалы детально описаны в монографии [21].

Ранее в работе [21] разработана модель и компьютерная программа, позволяющая производить компьютерный синтез линейных полимеров. Синтез производится на основе мельчайших базовых фрагментов, которые не могут быть «разрезаны» вдоль оси макромолекулы. В труде [21] имеются 96 базовых фрагментов, из которых в табл. 1 в качестве примера приведено 16 таких фрагментов.

**Табл. 1.** Химическое строение базового фрагмента, длины связей с соседними, химически связанными атомами; метки, характеризующие возможность химического связывания с тем или иным атомом; Ван-дер-Ваальсов объем базовых фрагментов

**Table 1.** The chemical structure of the base fragment, the length of bonds with neighboring, chemically bonded atoms; labels characterizing the possibility of chemical bonding with one or another atom; van der Waals volume of base fragments

| Номер фрагмента<br>Fragment number | Химическое строение фрагмента<br>The chemical structure of the fragment | Длины связей с соседними атомами<br>Bond lengths with neighboring atoms, Å |                 | Метки<br>Labels |                 | Ван-дер-Ваальсов объем<br>Van der Waals volume, Å <sup>3</sup> |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|
|                                    |                                                                         | левая<br>left                                                              | правая<br>right | левая<br>left   | правая<br>right |                                                                |
| 1                                  |                                                                         | 1,48;<br>1,54                                                              | 1,48;<br>1,54   | 1               | 1               | 17,1                                                           |
| 2                                  |                                                                         | 1,48;<br>1,54                                                              | 1,48;<br>1,54   | 2               | 2               | 92,6                                                           |
| 3                                  |                                                                         | 1,48;<br>1,54                                                              | 1,48;<br>1,54   | 1               | 1               | 27,1                                                           |
| 4                                  |                                                                         | 1,48                                                                       | 1,48            | 3               | 3               | 75,6                                                           |
| 5                                  |                                                                         | 1,54                                                                       | 1,50            | 2               | 4               | 54,9                                                           |
| 6                                  |                                                                         | 1,37                                                                       | 1,37            | 5               | 5               | 115,5                                                          |
| 7                                  |                                                                         | 1,5                                                                        | 1,50            | 9               | 8               | 2,7                                                            |

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

| Номер фрагмента<br>Fragment number | Химическое строение фрагмента<br>The chemical structure of the fragment | Длины связей<br>с соседними атомами<br>Bond lengths with<br>neighboring atoms, Å |                 | Метки<br>Labels |                 | Ван-дер-Ваальсов объем<br>Van der Waals volume, Å <sup>3</sup> |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|
|                                    |                                                                         | левая<br>left                                                                    | правая<br>right | левая<br>left   | правая<br>right |                                                                |
| 8                                  |                                                                         | 1,54                                                                             | 1,50            | 2               | 8               | 25,1                                                           |
| 9                                  |                                                                         | 1,54                                                                             | 1,37            | 2               | 6               | 20,1                                                           |
| 10                                 |                                                                         | 1,37                                                                             | 1,48;<br>1,54   | 11              | 14              | 28,4                                                           |
| 11                                 |                                                                         | 1,76                                                                             | 1,76            | 7               | 7               | 78,0                                                           |
| 12                                 |                                                                         | 1,76                                                                             | 1,76            | 12              | 12              | 26,1                                                           |
| 13                                 |                                                                         | 1,37                                                                             | 1,37            | 11              | 11              | 144,6                                                          |
| 14                                 |                                                                         | 1,37                                                                             | 1,37            | 5               | 11              | 113,4                                                          |
| 15                                 |                                                                         | 1,64                                                                             | 1,64            | 13              | 13              | 71,6                                                           |
| 16                                 |                                                                         | 1,64                                                                             | 1,64            | 10              | 10              | 0,5                                                            |

Метки определяют возможность химического присоединения атомов к структуре базового фрагмента. Среди атомов углерод С, водород Н, кислород О, азот N, сера S и др. Левая метка означает, что данный атом присоединяется к левой стороне базового фрагмента, а правая метка означает, что данный атом присоединяется к правой стороне базового фрагмен-

та. При этом присоединяемые атомы могут быть разными; например, с левой стороны присоединяется кислород, а с правой — углерод.

Цель исследования — разработка модели для написания компьютерной программы, позволяющей осуществлять подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, обладающих заданными интервалами

физических характеристик. Для полимеров, используемых в строительной индустрии, наиболее важными являются температура стеклования и коэффициент оптической чувствительности по напряжению, плотность, водопроницаемость, теплопроводность.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В предлагаемой работе, посвященной компьютерному синтезу сетчатых полимеров, линейные цепи представляют собой структурные элементы повторяющегося фрагмента сетки, связывающие узлы. Возможность присоединения того или иного атома к базовому фрагменту в процессе компьютерного синтеза определяется управляющей матрицей связанности, представленной в табл. 2.

Если  $(I, K) = 0$ , то фрагмент с меткой  $I$  не может соединиться с фрагментом с меткой  $K$ ; если  $(I, K) = 1$ , то фрагмент с меткой  $I$  может соединиться с фраг-

ментом с меткой  $K$ . Иными словами, матрица меток построена по следующему принципу: если рассматриваемый базовый фрагмент под номером  $I$  может химически присоединиться к базовому фрагменту под номером  $K$ , то ставится 1; если рассматриваемый базовый фрагмент под номером  $I$  не может химически присоединиться к базовому фрагменту под номером  $K$ , то ставится 0.

Перейдем к компьютерному синтезу сетчатых полимеров. Следует отметить, что в монографиях [22, 23] сетчатые полимеры не рассматриваются. Подход к оценке свойств сетчатых полимеров имеется только в монографии [21]. Согласно этим работам, узел сетки состоит из атома, от которого начинается разветвление цепей, и соседних, химически связанных с ним атомов. Последние содержат химические заместители, которые также входят в состав узла сетки. В табл. 3 для примера приведен ряд атомов и атомных структур, от которых происходят разветвления цепей.

**Табл. 2.** Матрица меток, которая управляет компьютерным синтезом полимеров

**Table 2.** Label matrix that controls the computer-generated synthesis of polymers

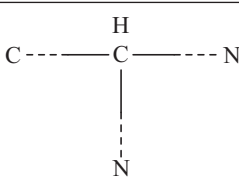
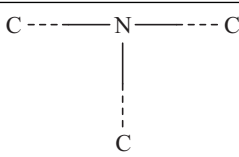
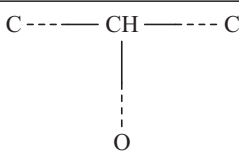
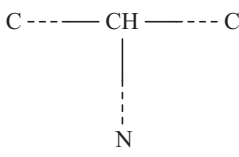
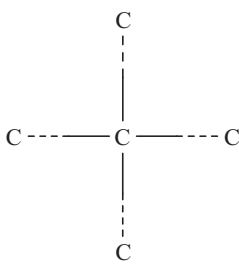
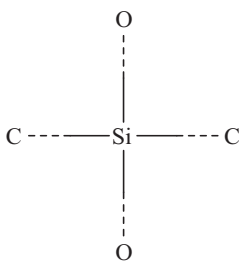
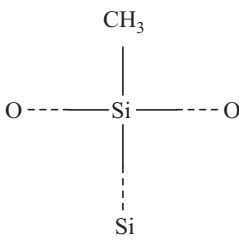
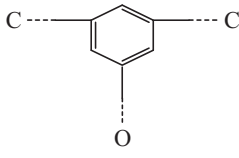
| Метки<br>Labels | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1               | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2               | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3               | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4               | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5               | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 6               | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 7               | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  |
| 8               | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9               | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 11              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |

**Табл. 3.** Химическое строение узла сетки, длины связей с соседними, химически связанными атомами; метки, характеризующие возможность химического связывания с тем или иным атомом; Ван-дер-Ваальсов объем узла сетки

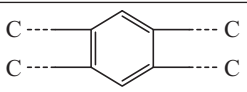
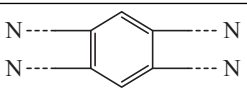
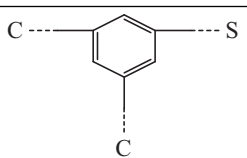
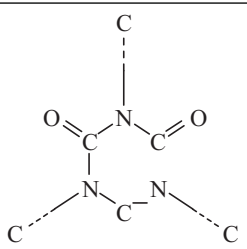
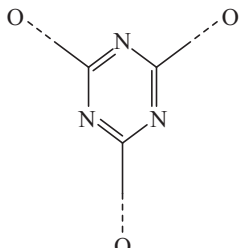
**Table 3.** The chemical structure of the network cross-linked point, the length of bonds with neighboring, chemically bonded atoms; labels characterizing the possibility of chemical bonding with one or another atom; van der Waals volume of a network cross-linked point

| Фрагмент<br>Fragment                                                                                                         | Длина связи, Å (метки)<br>Bond length, Å (labels) |                 |                 |               | Ван-дер-Ваальсов объем<br>Van der Waals volume, Å <sup>3</sup> | $\sum K_i \Delta V_i, i K^{-1} \cdot \text{Å}^3$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                                                                              | слева<br>left                                     | справа<br>right | снизу<br>bottom | сверху<br>top |                                                                |                                                  |
| $  \begin{array}{c}  \text{C} \text{ --- } \text{CH} \text{ --- } \text{C} \\    \\  \text{---} \\  \text{C}  \end{array}  $ | 1,54<br>(2)                                       | 1,54<br>(2)     | 1,54<br>(2)     | —             | 11,0                                                           | 15,00                                            |

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

| Фрагмент<br>Fragment                                                                | Длина связи, Å (метки)<br>Bond length, Å (labels) |                 |                 |               | Ван-дер-Ваальсов объем<br>Van der Waals volume, Å <sup>3</sup> | $\sum K_i \Delta V_i, i K^{-1} \cdot \text{Å}^3$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                                     | слева<br>left                                     | справа<br>right | снизу<br>bottom | сверху<br>top |                                                                |                                                  |
|    | 1,54<br>(14)                                      | 1,40<br>(6)     | 1,40<br>(6)     | —             | 14,1                                                           | 18,53                                            |
|    | 1,40<br>(11)                                      | 1,40<br>(11)    | 1,40<br>(11)    | —             | 1,5                                                            | 3,78                                             |
|    | 1,54<br>(2)                                       | 1,54<br>(2)     | 1,50<br>(4)     | —             | 14,2                                                           | 15,00                                            |
|   | 1,54<br>(2)                                       | 1,54<br>(2)     | 1,40<br>(11)    | —             | 12,6                                                           | 15,00                                            |
|  | 1,54<br>(2)                                       | 1,54<br>(2)     | 1,54<br>(2)     | 1,54<br>(2)   | 5,0                                                            | 5,75                                             |
|  | 1,88<br>(2)                                       | 1,88<br>(2)     | 1,64<br>(13)    | 1,64<br>(13)  | 27,6                                                           | 24,84                                            |
|  | 1,64<br>(13)                                      | 1,64<br>(13)    | 2,32<br>(10)    | —             | 49,6                                                           | 58,9                                             |
|  | 1,48<br>(3)                                       | 1,48<br>(3)     | 1,37<br>(5)     | —             | 72,5                                                           | 90,32                                            |

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

| Фрагмент<br>Fragment                                                               | Длина связи, Å (метки)<br>Bond length, Å (labels) |                 |                 |               | Ван-дер-Ваальсов объем<br>Van der Waals volume, Å <sup>3</sup> | $\sum K_i \Delta V_i, i K^{-1} \cdot \text{Å}^3$ |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                                    | слева<br>left                                     | справа<br>right | снизу<br>bottom | сверху<br>top |                                                                |                                                  |
|   | 1,48<br>(3)                                       | 1,48<br>(3)     | 1,48<br>(3)     | 1,48<br>(3)   | 63,1                                                           | 77,08                                            |
|   | 1,37<br>(6)                                       | 1,37<br>(6)     | 1,37<br>(6)     | 1,37<br>(6)   | 70,2                                                           | 85,36                                            |
|   | 1,48<br>(3)                                       | 1,76<br>(7)     | 1,48<br>(3)     | —             | 70,5                                                           | 88,02                                            |
|   | 1,40<br>(11)                                      | 1,40<br>(11)    | 1,40<br>(11)    | —             | 70,35                                                          | 122,17                                           |
|  | 1,37<br>(5)                                       | 1,37<br>(5)     | 1,37<br>(5)     | —             | 65,7                                                           | 98,52                                            |

Для описания плотности  $\rho$  или удельного объема  $v$  воспользуемся уравнением, предложенным в работе [21]:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{N_A \sum_i \Delta V_i}{k M_0}, \quad (1)$$

где  $N_A$  — число Авогадро;  $\sum_i \Delta V_i$  — Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося фрагмента сетки;  $k$  — коэффициент молекулярной упаковки;  $M_0$  — молекулярная масса этого фрагмента.

Величина  $v$  измеряется в см<sup>3</sup>/г; величина  $\rho$  — в г/см<sup>3</sup>;  $\sum_i \Delta V_i$  — в Å<sup>3</sup>; величина  $M_0$  — в дальтонах. Средняя величина  $k$  равняется 0,681.

Теплопроводность сетчатого полимера  $\lambda$  рассчитывается по уравнению [25]:

$$\lambda = A \frac{c_p \rho^{4/3}}{\left(\frac{M_0}{m}\right)^{1/3}}, \quad (2)$$

где  $c_p$  — теплоемкость (Дж/моль/град);  $M_0$  — молекулярная масса повторяющегося фрагмента;  $m$  — количество атомов в повторяющемся фрагменте.

Величина  $A$ , зависящая от химического строения полимера, выражена следующим соотношением [25]:

$$A = \frac{\sum_i a_i + \sum_j b_j}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (3)$$

где  $a_i$  — атомные константы, характерные для каждого атома;  $b_j$  — константы для полярных групп, приводящих к диполь-дипольному взаимодействию или к водородным связям;  $N_A$  — число Авогадро;  $\Delta V_i$  — Ван-дер-Ваальсов объем  $i$ -го атома.

Величина  $\lambda$  измеряется в Вт/(м<sup>2</sup>·К); величины  $a_i$  и  $b_j$  — в  $[N_A \sum_i \Delta V_i \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{К)} \cdot \text{Дальтон}^{1/3}] / [\text{К} \cdot \text{Дж/моль} \cdot (\text{г/см}^3)^{4/3}]$ .

Водопроницаемость  $P$  полимеров описывается уравнением:

$$P = P_0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}}, \quad (4)$$

где  $P_0$  — константа;  $\Delta E$  — энергия активации процесса проницаемости;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Величина  $\Delta E$  отображается следующим соотношением [24]:

$$\Delta E = \frac{\sum_i \Delta E_i^{**}}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (5)$$

где  $N_A$  — число Авогадро;  $\sum_i \Delta V_i$  — Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося фрагмента сетчатого полимера;  $\sum_i \Delta E_i^{**}$  — энергия активации процесса проницаемости  $\sum_i \Delta E_i^*$ , умноженная на Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося звена, складывающийся из Ван-дер-Ваальсовых объемов каждого атома или специфической полярной группы, которая вызывает диполь-дипольные взаимодействия или водородные связи.

Объединяя уравнение (4) и соотношение (5), получаем:

$$\frac{\sum_i \Delta E_i^{**}}{RT} - \left( N_A \sum_i \Delta V_i \right) \ln P_0 = - \left( N_A \sum_i \Delta V_i \right) \ln P. \quad (6)$$

Температура начала интенсивной термической деструкции  $T_d$  описывается соотношением [21]:

$$T_d = \frac{\sum_i \Delta V_i}{\sum_i K_i \Delta V_i}. \quad (7)$$

Величина  $K_i = 31,5R \frac{R}{(a d_0 E)_i}$ , где  $a$  — константа в потенциале Морзе;  $d_0$  — равновесное расстояние

между химически связанными атомами;  $E$  — энергия диссоциации химических связей.

Коэффициент оптической чувствительности по напряжению  $C_\sigma$  описывается соотношением [21]:

$$C_\sigma = \frac{\sum_i C_i}{N_A \sum_i \Delta V_i} + \Pi, \quad (8)$$

где  $C_i$  — атомные константы, характеризующие вклады каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в коэффициент оптической чувствительности,  $\Pi = 0,3544 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кг}$  (универсальный параметр).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

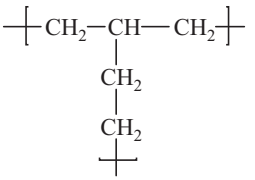
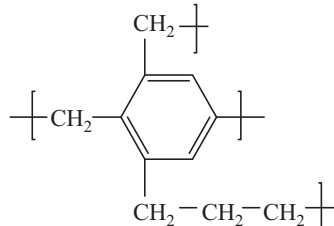
В качестве примера приведем структуры пяти повторяющихся фрагментов полимерных сеток (табл. 4). Интервал плотностей выбран от 0,98 до 1,32 г/см<sup>3</sup>, интервал  $T_d$  — от 680 до 750 К; интервалы водопроницаемости — от 30 до 320 Баррер (малая водопроницаемость) и от 13 000 до 15 000 Баррер (большая водопроницаемость); интервал теплопроводности — от 0,140 до 0,340 Вт/(м<sup>2</sup>·К); интервал  $C_\sigma$  — от 25 до 300 Брюстер.

Все значения физических характеристик попадают в заданные интервалы.

Для подтверждения адекватности предлагаемой модели приведем известные на практике сетчатые полимеры, рассчитаем их свойства (температуру стеклования) и сопоставим расчетные и экспериментальные данные. Структуры повторяющихся фрагментов, расчетные и экспериментальные данные включены в табл. 5.

Табл. 4. Повторяющиеся фрагменты полимерных сеток и их физические характеристики

Table 4. Repeating fragments of polymer networks and their physical characteristics

| Химическое строение повторяющегося фрагмента<br>Chemical structure of a repeating fragment                                                                 | $\rho$ , г/см <sup>3</sup><br>g/cm <sup>3</sup> | $T_d$ , К | $P$ , Баррер<br>Barrer | $\lambda$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·К)<br>W/(m <sup>2</sup> ·K) | $C_\sigma$ ,<br>Брюстер<br>Brewster |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <br>Радиационно-сшитый полиэтилен<br>Radiation-crosslinked polyethylene | 0,985                                           | 709       | 253                    | 0,155                                                          | 41,3                                |
|                                                                         | 1,110                                           | 748       | 160                    | 0,152                                                          | 29,8                                |

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

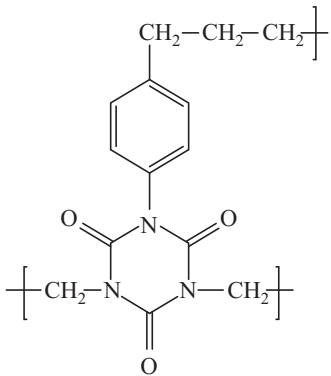
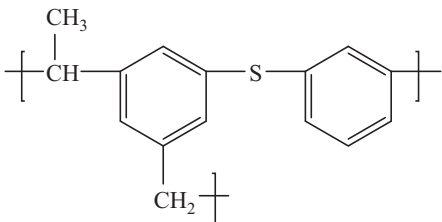
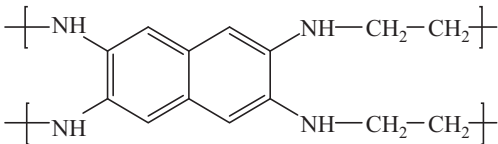
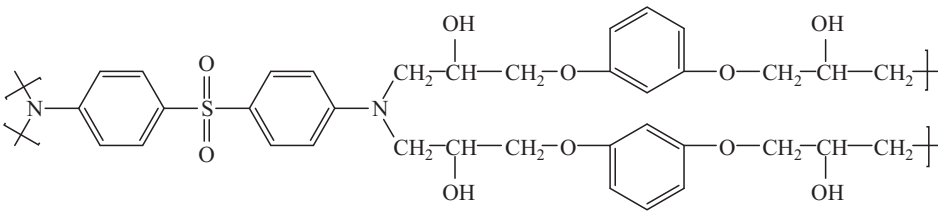
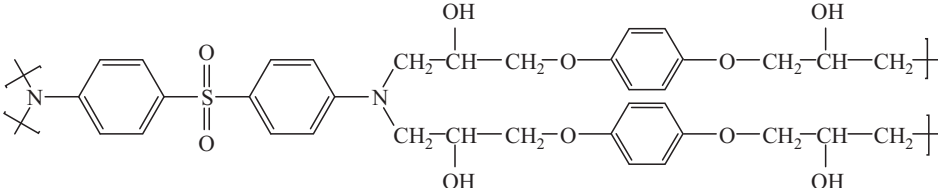
| Химическое строение повторяющегося фрагмента<br>Chemical structure of a repeating fragment | $\rho$ , г/см <sup>3</sup><br>g/cm <sup>3</sup> | $T_d$ , К | $P$ , Баррер<br>Barrer | $\lambda$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·К)<br>W/(m <sup>2</sup> ·K) | $C_{\sigma}$ ,<br>Брюстер<br>Brewster |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|           | 1,310                                           | 684       | 318                    | 0,146                                                          | 248                                   |
|           | 1,190                                           | 722       | 14900                  | 0,239                                                          | 57,3                                  |
|          | 1,210                                           | 736       | 39,5                   | 0,336                                                          | 293                                   |

Табл. 5. Структуры ряда отвержденных эпоксидных смол и их температуры стеклования

Table 5. Structures of a number of cured epoxy resins and their glass transition temperatures

| Структуры отвержденных эпоксидных смол<br>Structures of cured epoxy resins                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $T_g$ , эксп.<br>exp., К | $T_g$ , расч.<br>calc., К |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
|  <p>Повторяющийся фрагмент эпоксидной смолы на основе диглицидилового эфира <i>m</i>-фениленоксида, отвержденной диамином дифениленсульфона<br/>Repeating fragment of epoxy resin based on diglycidyl ether of <i>m</i>-phenylene oxide, cured with diphenylene sulfone diamine</p>    | 429<br>[26, 27]          | 421                       |
|  <p>Повторяющийся фрагмент эпоксидной смолы на основе диглицидилового эфира <i>p</i>-фениленоксида, отвержденной диамином дифениленсульфона<br/>Repeating fragment of an epoxy resin based on diglycidyl ether of <i>p</i>-phenylene oxide, cured with diphenylene sulfone diamine</p> | 434<br>[26, 27]          | 435                       |

Из табл. 5 видно, что величины экспериментальных и расчетных температур совпадают с хорошей точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показана принципиальная возможность проведения подбора структуры повторяющихся звеньев не только линейных полимеров, что было разработано нами ранее [21], но и повторяющихся структурных фрагментов сетчатых полимеров.

Предложенная модель и соответствующая компьютерная программа позволяют конструировать полимерные сетки самого разнообразного химического строения и топологии.

Среди сетчатых полимеров наибольшее значение имеют отвержденные эпоксидные смолы, которые применяются для получения покрытий, и полиуретаны, используемые для получения герметиков.

Для подтверждения адекватности предлагаемой модели приведены известные на практике сетчатые полимеры, расчетные и экспериментальные температуры стеклования которых практически совпадают.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007 и тема Госзадания ИНЭОС РАН № 0085-2019-0004).

В работе по теме № FSWG-2020-0007 (МГСУ) проведены расчеты Ван-дер-Ваальсовых объемов для базовых фрагментов, предложены химические структуры узлов сетчатых полимеров и произведены расчеты Ван-дер-Ваальсовых объемов и наборов констант, характеризующих температуру начала интенсивной термической деструкции, составлена управляющая матрица взаимодействий с соседними атомами. В работе по теме № 0085-2019-0004 (ИНЭОС РАН) получены химические структуры сетчатых полимеров с заданным интервалом физических характеристик и выполнены расчеты с помощью компьютерной программы «Каскад» этих характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.А., Мартымянова Ю.А., Родионова А.С., Стукан М.П. Компьютерное моделирование жесткоцепных полимеров // Высокомолекулярные соединения. 2013. Т. 55. № 7. С. 808. DOI: 10.7868/S050754751306010X
2. Аристов В.М., Аристова Е.П. Математическое моделирование изменения структурной неоднородности и свойств полимеров при технологических процессах их термообработки // Пластические массы. 2018. № 5–6. С. 35–37. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-5-6-35-37
3. Falkovich S., Lyulin S., Nazarychev V., Larin S., Gurtovenko A., Lukasheva N. et al. Influence of the electrostatic interactions on thermophysical properties of polyimides: Molecular-dynamics simulations // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2014. № 52. Issue 9. Pp. 640–646. DOI: 10.1002/polb.23460
4. Posada P., Velásquez-Cock J., Gómez-Hoyos C., Serpa Guerra A.M., Lyulin S.V., Kenny J.M. et al. Drying and redispersion of plant cellulose nanofibers for industrial applications: a review // Cellulose. 2020. Vol. 27. Issue 18. Pp. 10649–10670. DOI: 10.1007/s10570-020-03348-7
5. Davris T., Lyulin A.V., Baljon A.R.C., Nazarychev V.M., Volgin I.V., Larin S.V. et al. Linear Viscoelasticity of polymers and polymer nanocomposites: Molecular-dynamics large amplitude oscillatory shear and probe rheology simulations // Advances in Dielectrics. 2018. Pp. 375–404. DOI: 10.1007/978-3-319-72706-6\_12
6. Nazarychev V.M., Lyulin A.V., Larin S.V., Gurtovenko A.A., Kenny J.M., Lyulin S.V. Molecular dynamics simulations of uniaxial deformation of thermoplastic polyimides // Soft Matter. 2016. Vol. 12. Issue 17. Pp. 3972–3981. DOI: 10.1039/c6sm00230g
7. Glova A.D., Melnikova S.D., Mercurieva A.A., Larin S.V., Lyulin S.V. Grafting-induced structural ordering of lactide chains // Polymers. 2019. Vol. 11. Issue 12. P. 2056. DOI: 10.3390/polym11122056
8. Gavrilov A.A., Chertovich A.V. Computer simulation of random polymer networks: Structure and properties // Polymer Science Series A. 2014. Vol. 56. Issue 1. Pp. 90–97. DOI: 10.1134/S0965545X14010027
9. Frenkel D., Smit B. Understanding molecular simulation: from algorithms to applications. Academic Press, an imprint of Elsevier, 2002. P. 664.
10. Schlick T. Molecular modeling and simulation // Interdisciplinary applied mathematics. 2002. DOI: 10.1007/978-0-387-22464-0
11. Zavaliangos A., Tikare V., Olevsky E.A. Modeling and numerical simulation of materials behavior and evolution // MES Symposium Proceeding. 2002. Vol. 731. 322 p.
12. Kremer K. Computer simulations for macromolecular science // Macromolecular Chemistry and Physics. 2003. Vol. 204. Issue 2. Pp. 257–264. DOI: 10.1002/macp.200290079
13. Theodorou D.N. Understanding and predicting structure–property relations in polymeric materials through molecular simulations // Molecular

Physics. 2004. Vol. 102. Issue 2. Pp. 147–166. DOI: 10.1080/00268970310001640085

14. Zeng Q.H., Yu A.B., Lu G.Q. Multiscale modeling and simulation of polymer nanocomposites // Progress in Polymer Science. 2008. Vol. 33. Pp. 191–269. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2007.09.002

15. Jurjiu A., Galiceanu M. Dynamics of a polymer network modeled by a fractal cactus // Polymers. 2018. Vol. 10. Issue 7. P. 787. DOI: 10.3390/polym10070787

16. Panyukov S. Loops in polymer networks // Macromolecules. 2019. Vol. 52. Issue 11. Pp. 4145–4153. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b00782

17. Panyukov S. Theory of flexible polymer networks: Elasticity and heterogeneities // Polymers. 2020. Vol. 12. Issue 4. P. 767. DOI: 10.3390/polym12040767

18. Rong J., Zhong J., Yan M., Liu M., Zhang Y., Qiao Y. et al. Study on waterborne self-healing polyurethane with dual dynamic units of quadruple hydrogen bonding and disulfide bonds // Polymer. 2021. Vol. 221. P. 123625. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123625

19. Eaton M.D., Brinson L.C., Shull K.R. Temperature dependent fracture behavior in model epoxy networks with nanoscale heterogeneity // Polymer. 2021. Vol. 221. P. 123560. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123560

20. Shan S., Lin Y., Zhang A. Stretchable, robust and reprocessable poly(siloxane-urethanes) elastomers based on exchangeable aromatic disulfides //

Polymer. 2021. Vol. 221. P. 123588. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123588

21. Askadskii A.A. Computational materials science of polymers // Materials Today. 2003. Vol. 6. Issue 4. P. 52. DOI: 10.1016/s1369-7021(03)00438-3

22. Van Krevelen D.W. Properties of polymers. Amsterdam : Elsevier, 2009. 1030 p.

23. Bicerano J. Prediction of polymer properties. New York : Marcel Dekker, 2002. 784 p.

24. Аскадский А.А., Афанасьев Е.С., Мацевич Т.А., Попова М.Н., Коврига О.В., Кондращенко В.И. Расчетная схема для оценки проницаемости воды через полимеры и сополимеры // Высокомолекулярные соединения. 2015. Т. 57. № 6. С. 582. DOI: 10.7868/S2308112015060012

25. Аскадский А.А., Петунова М.Д., Марков В.А. Расчетная схема для оценки теплопроводности полимеров // Высокомолекулярные соединения. 2013. Т. 55. № 12. С. 1473–1479. DOI: 10.7868/S0507547513090018

26. Пономарева Т.И., Иржак В.И., Розенберг Б.А. О связи температуры стеклования сетчатых эпоксидных полимеров с их химическим строением // Высокомолекулярные соединения. 1978. Т. 20. № 3. С. 597–602.

27. Иржак В.И., Розенберг Б.А., Ениколопан Н.С. Сетчатые полимеры — синтез, структура и свойства. М. : Наука, 1978. 248 с.

Поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 29 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 5 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Александрович Аскадский — доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией полимерных материалов; Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН); 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 28; консультант Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 45753, Scopus: 7005352868; andrey@ineos.ac.ru;

Сергей Вячеславович Матеевич — студент бакалавриата; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова); 119991, г. Москва, Ленинские горы; svmas@mail.ru;

Татьяна Анатольевна Матеевич — доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 690808, Scopus: 51461741900, ResearcherID: AAB-2742-2020, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru.

## REFERENCES

1. Ivanov V.A., Martem'yanova YU.A., Rodionova A.S., Stukan M.R. Computer modeling of rigid-chain polymers. *Polymer Science*. 2013; 55(7):808. DOI: 10.7868/S050754751306010X (rus.).

2. Aristov V.M., Aristova E.P. Mathematical modeling of changes in structural heterogeneity and properties of polymers during technological processes of their heat treatment. *Plasticheskie massy*.

2018; 5-6:35-37. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-5-6-35-37 (rus.).

3. Falkovich S., Lyulin S., Nazarychev V., Larin S., Gurtovenko A., Lukasheva N. et al. Influence of the electrostatic interactions on thermophysical properties of polyimides: Molecular-dynamics simulations. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2014; 52(9):640-646. DOI: 10.1002/polb.23460

4. Posada P., Velásquez-Cock J., Gómez-Hoyos C., Serpa Guerra A.M., Lyulin S.V., Kenny J.M. et al. Drying and redispersion of plant cellulose nanofibers for industrial applications: a review. *Cellulose*. 2020; 27(18):10649-10670. DOI: 10.1007/s10570-020-03348-7
5. Davris T., Lyulin A.V., Baljon A.R.C., Nazarychev V.M., Volgin I.V., Larin S.V. et al. Linear viscoelasticity of polymers and polymer nanocomposites: Molecular-Dynamics large amplitude oscillatory shear and probe rheology simulations. *Advances in Dielectrics*. 2018; 375-404. DOI: 10.1007/978-3-319-72706-6\_12
6. Nazarychev V.M., Lyulin A.V., Larin S.V., Gurtovenko A.A., Kenny J.M., Lyulin S.V. Molecular dynamics simulations of uniaxial deformation of thermoplastic polyimides. *Soft Matter*. 2016; 12(17):3972-3981. DOI: 10.1039/c6sm00230g
7. Glova A.D., Melnikova S.D., Mercurieva A.A., Larin S.V., Lyulin S.V. Grafting-induced structural ordering of lactide chains. *Polymers*. 2019; 11(12):2056. DOI: 10.3390/polym11122056
8. Gavrilov A.A., Chertovich A.V. Computer simulation of random polymer networks: Structure and properties. *Polymer Science Series A*. 2014; 56(1): 90-97. DOI: 10.1134/S0965545X14010027
9. Frenkel D., Smit B. *Understanding molecular simulation: from algorithms to applications*. Academic Press, an imprint of Elsevier, 2002; 664.
10. Schlick T. Molecular modeling and simulation. *Interdisciplinary applied mathematics*. 2002. DOI: 10.1007/978-0-387-22464-0
11. Zavaliangos A., Tikare V., Olevsky E.A. Modeling and numerical simulation of materials behavior and evolution. *MES Symposium Proceeding*. 2002; 731:322.
12. Kremer K. Computer simulations for macromolecular science. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2003; 204(2):257-264. DOI: 10.1002/macp.200290079
13. Theodorou D.N. Understanding and predicting structure-property relations in polymeric materials through molecular simulations. *Molecular Physics*. 2004; 102(2):147-166. DOI: 10.1080/00268970310001640085
14. Zeng Q.H., Yu A.B., Lu G.Q. Multiscale modeling and simulation of polymer nanocomposites. *Progress in Polymer Science*. 2008; 33:191-269. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2007.09.002
15. Jurjiu A., Galiceanu M. Dynamics of a polymer network modeled by a fractal cactus. *Polymers*. 2018; 10(7):787. DOI: 10.3390/polym10070787
16. Panyukov S. Loops in polymer networks. *Macromolecules*. 2019; 52(11):4145-4153. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b00782
17. Panyukov S. Theory of flexible polymer networks: Elasticity and heterogeneities. *Polymers*. 2020; 12(4):767. DOI: 10.3390/polym12040767
18. Rong J., Zhong J., Yan M., Liu M., Zhang Y., Qiao Y. et al. Study on waterborne self-healing polyurethane with dual dynamic units of quadruple hydrogen bonding and disulfide bonds. *Polymer*. 2021; 221:123625. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123625
19. Eaton M.D., Brinson L.C., Shull K.R. Temperature dependent fracture behavior in model epoxy networks with nanoscale heterogeneity. *Polymer*. 2021; 221:123560. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123560
20. Shan S., Lin Y., Zhang A. Stretchable, robust and reprocessable poly(siloxane-urethanes) elastomers based on exchangeable aromatic disulfides. *Polymer*. 2021; 221:123588. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123588
21. Askadskii A.A. Computational materials science of polymers. *Materials Today*. 2003; 6(4):52. DOI: 10.1016/s1369-7021(03)00438-3
22. Van Krevelen D.W. *Properties of polymers*. Amsterdam, Elsevier, 2009; 1030.
23. Bicerano J. *Prediction of polymer properties*. New York, Marcel Dekker, 2002; 784.
24. Askadskii A.A., Matseevich T.A., Popova M.N., Afanas'ev E.S., Kovriga O.V., Kondrashchenko V.I. The calculation scheme for estimation of the water permeability through polymers and copolymers. *Polymer Science*. 2015; 57(6):582. DOI: 10.7868/S2308112015060012 (rus.).
25. Askadskii A.A., Petunova M.D., Markov V.A. Calculation scheme for the evaluation of polymer thermal conductivity. *Polymer Science*. 2013; 55(12):1473-1479. DOI: 10.7868/S0507547513090018 (rus.).
26. Ponomareva T.I., Irzhak V.I., Rozenberg B.A. On the relation between the glass temperature of network epoxide polymers and their chemical structure. *Polymer Science*. 1978; 20(3):597-602. (rus.).
27. Irzhak V.I., Rozenberg B.A., Enikolopyan N.S. *Mesh polymers — synthesis, structure and properties*. Moscow, Nauka, 1978; 248. (rus.).

Received February 15, 2021.

Adopted in revised form on March 29, 2021.

Approved for publication on April 5, 2021.

**BIONOTES:** **Andrey A. Askadskii** — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the laboratory; **A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)**; 28 Vavilova st., Moscow, 119991, Russian Federation; Consultant of the Research Institute of Building Materials and Technologies; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 45753, Scopus: 7005352868; andrey@ineos.ac.ru;

**Sergey V. Matseevich** — undergraduate student; **Lomonosov Moscow State University**; GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; cvmac@mail.ru;

**Tat'yana A. Matseevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690808, Scopus: 51461741900, ResearcherID: AAB-2742-2020, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru.

## Оценка влияния заиливания трубопровода на его пропускную способность

А.Э. Тен, Н.Т. Джумагулова, Ю.В. Брянская

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время при строительстве инженерных систем различного назначения используются трубопроводы из полимерных материалов. При проведении гидравлических расчетов зачастую такие трубопроводы считаются гладкими. Данное предположение в большинстве случаев принимается без проведения гидравлических испытаний. Трубопроводы с гофрированной поверхностью, представляющей собой регулярные местные сопротивления, следует рассматривать как шероховатые. Для установления особенностей их работы и повышения точности гидравлических расчетов необходимо проведение экспериментальных исследований. Гофрированный трубопровод АСО Qmax был разработан в качестве дренажной системы для отвода поверхностного стока. Цель работы — сравнение пропускной способности трубопровода системы АСО Qmax при частичном заиливании в пределах гофра и при его отсутствии.

**Материалы и методы.** Ввиду сложной структуры внутренней поверхности сопротивление описанного полимерного трубопровода возможно определить только опытным путем. С помощью экспериментов в лаборатории гидравлики и гидромеханики НИИ МГСУ выявлены гидравлические характеристики для гофрированного трубопровода АСО Qmax с частичным заиливанием в пределах нижней части гофра.

**Результаты.** Эксперименты выполнялись при следующих режимах: при расходах  $Q$  (от 13,9 до 79,1 м<sup>3</sup>/ч) и уклоне дна лотка  $i = 0,005$ ; при расходах  $Q$  (от 14 до 89,1 м<sup>3</sup>/ч) и уклоне дна лотка  $i = 0,01$ .

**Выводы.** По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о том, что частичное заиливание трубопровода в пределах гофра лотковой части практически не оказывает влияния на его гидравлическое сопротивление. Сравнение экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе показывает, что они практически не различаются. Полученные значения коэффициента шероховатости можно принять для данного трубопровода постоянными.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гофрированный трубопровод, трубопровод из полимерных материалов, гидравлическое сопротивление, глубина потока, заиливание, коэффициент гидравлического сопротивления, коэффициент шероховатости

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тен А.Э., Джумагулова Н.Т., Брянская Ю.В. Оценка влияния заиливания трубопровода на его пропускную способность // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 360–369. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.360-369

## Impact assessment of silting on pipeline capacity

Andrey E. Ten, Nazira T. Dzhumagulova, Yuliya V. Bryanskaya

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, in the construction of engineering systems for various purposes, pipelines made of polymer materials are often used. The ACO Qmax corrugated pipeline was developed as a drainage system for the drainage of surface runoff. The widespread use in practice of corrugated pipes, which have a significantly higher roughness than technically smooth ones, has caused the need to perform a number of calculations that take into account the features of their hydraulic operation. The purpose of the work is to compare the pipeline capacity in the case of partial silting within the corrugation and in the absence of it.

**Materials and methods.** Due to the complex structure of the inner surface, the resistance of the described polymer pipeline can only be determined experimentally. The hydraulic characteristics of the ACO Qmax corrugated pipeline with partial silting were determined experimentally in the Laboratory of Hydraulics and Hydromechanics of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

**Results.** The experiments were carried out under the following conditions: at flow rates  $Q$  (from 13.9 to 79.1 m<sup>3</sup>/h) and the slope of the bottom of the tray  $i = 0.005$ ; at flow rates  $Q$  (from 14 to 89.1 m<sup>3</sup>/h) and the slope of the bottom of the tray  $i = 0.01$ . According to the experimental data obtained, the values of the hydraulic resistance coefficient, the Shezi coefficient, the Manning roughness, and the average flow velocity were calculated. The roughness obtained in a "clean" and partially silted pipeline is compared.

**Conclusions.** According to the results of the conducted experimental studies, it is concluded that the partial silting of the pipeline within the corrugation of the tray part practically does not affect its hydraulic resistance. A comparison of the experimen-

tal values of the average flow velocities in a silted and non-silted pipeline shows that they practically do not differ. Thus, the obtained values of the roughness coefficient can be assumed to be constant for this pipeline.

**KEYWORDS:** corrugated pipeline, pipeline made of polymer materials, hydraulic resistance, flow depth, silting, drag coefficient, roughness coefficient

**FOR CITATION:** Ten A.E., Dzhumagulova N.T., Bryanskaya Yu.V. Impact assessment of silting on pipeline capacity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):360-369. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.360-369 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на рынке появляются новые строительные материалы, которые широко внедряются в инженерной практике, в том числе при производстве трубопроводов различного назначения. При строительстве трубопроводов и коллекторов довольно часто используют пластмассовые (полимерные) трубы, что составляет около 25 % от общего объема [1]. Важнейшими характеристиками, определяющими выбор полимерного материала, являются их коррозионная стойкость, повышенная долговечность, малый вес и т.д.<sup>1</sup> [2, 3]. Считается, что в этих трубах с течением времени гидравлическое сопротивление не увеличивается. В результате, что очень важно, водопропускная способность таких труб в период эксплуатации не сокращается<sup>2, 3</sup> [4]. Особый интерес для решения практических задач представляет движение жидкости в открытых каналах [5]. Один из основных вопросов, решаемых при проектировании трубопроводных инженерных систем, — гидравлический расчет, учитывающий потери напора на трение по длине трубы и потери в местных сопротивлениях [6–8]. Общеизвестно, что величина потерь напора зависит от состояния внутренней поверхности трубы. Как правило, коэффициент шероховатости трубопроводов из полимерных материалов неизвестен. Считается, что шероховатость пластмассовых трубопроводов мала, и при гидравлическом расчете их можно считать гладкими. Однако состояние внутренней поверхности трубопроводов в значительной степени зависит от технологии их производства, наличия стыков, ребер жесткости и т.п. Несмотря на то, что пластмассовые трубопроводы применяются уже несколько десятилетий, особенности их гидравлической работы до сих пор мало изучены [9–13]. И в отечественной, и в зарубежной литературе вопрос об изучении гидравлического сопротивления трубопроводов и каналов из различных материалов остается актуальным [14–23].

<sup>1</sup> Выбор характеристик полиэтиленовых труб в зависимости от результатов гидравлического расчета // Сантехника. 2019. № 2. С. 22–25.

<sup>2</sup> Методическое пособие по проектированию и монтажу наружных сетей водоотведения из полипропиленовых гофрированных труб SN8, SN10, SN16. СПб., 2019.

<sup>3</sup> СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гофрированный трубопровод АСО Qmax был разработан в качестве дренажной системы для отвода поверхностного стока. Трубопровод изготовлен из полиэтилена, включая материалы вторичного использования, он прочный и устойчивый к коррозии. В заводском производстве трубы длиной 2 м имеют герметичные соединения между отдельными секциями, просты при сборке и монтаже.



**Рис. 1.** Трубопровод системы АСО Qmax при отсутствии заиливания

**Fig. 1.** The pipeline of the ACO Qmax system in the absence of silting

Сложный профиль внутренней поверхности трубы системы АСО Qmax по всей длине секции представляет собой регулярные впадины размером 11 × 11 мм, образованные ребрами жесткости трубопровода, перемежающиеся через каждые 1,4 м полыми опорами глубиной 50 мм и шириной 55 мм. Постоянные сужения и расширения — это регулярные местные сопротивления (рис. 1), которые для упрощения описания и оценки обобщенного гидравлического сопротивления трубопровода можно условно трактовать как некоторую макрошероховатость. Трубопроводы системы АСО Qmax работают, как правило, в безнапорном режиме, следовательно, имеют свободную поверхность, положение которой при неравномерном и неустановившемся движении может изменяться с течением времени, а также по длине потока. Как известно, такие гидравлические характеристики потока, как глубина, расход, уклон дна канала и уклон свободной поверхности, взаимосвязаны [5, 24, 25], что усложняет математическое описание процесса движения жидкости. Ввиду слож-

ной структуры внутренней поверхности сопротивление описанного полимерного трубопровода возможно определить только опытным путем.

В процессе эксплуатации углубления в придонной части трубопровода будут заполняться загрязнениями, содержащимися в сточных водах. Для оценки изменения гидравлических характеристик выполнены экспериментальные исследования по определению пропускной способности гофрированного трубопровода АСО Qmax с частичным заиливанием нижней части трубопровода в пределах гофра в лаборатории гидравлики и гидромеханики НИУ МГСУ.

Данная работа является продолжением исследований, посвященных экспериментальному изучению гидравлических характеристик гофрированного трубопровода АСО Qmax [26].

Экспериментальные исследования, описанные в настоящей статье, направлены на изучение гидравлических характеристик трубы при эксплуатации с частичным заиливанием нижней части гофра. Гофрированные складки в придонной области и полые опоры были заполнены плиточным клеем, который после высыхания покрыт эпоксидным клеем для предотвращения вымывания заполнителя и имитации отложений ила на поверхности (рис. 2).



Рис. 2. Трубопровод системы АСО Qmax с имитацией частичного заиливания придонной части

Fig. 2. The pipeline of the ACO Qmax system with simulation of partial silting of the bottom part

В ходе экспериментов осуществлялись замеры:

- наполнения трубопровода в зависимости от расхода;

- изменения глубины по длине трубопровода для различных уклонов;

- средней скорости потока при различных расходах.

При проведении экспериментов исследуемый трубопровод был установлен в лабораторном канале<sup>4</sup> (изготовитель G.U.N.T. Gerätebau GmbH (Германия))

длиной 15,5 м, шириной  $B = 0,31$  м. Исходя из параметров лабораторного канала, для экспериментальных исследований взят натурный трубопровод диаметром 225 мм, суммарная длина установленного трубопровода составила 14 м (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальный стенд

Fig. 3. The experimental stand

Лабораторный канал оборудован электромагнитным расходомером Promag 10D80<sup>5</sup>, пультом управления режимом работы лотка, коммутатором дистанционного управления лабораторным каналом, пультом управления уклоном канала, управляющим компьютером со специализированным программным обеспечением.

Наполнение трубопровода производилось сосредоточенно из резервуара экспериментального стенда. Для сопоставления опытных данных, полученных для «чистого» трубопровода и трубопровода с частичным заиливанием гофрированных складок в придонной части, расходы и уклоны были выбраны такими же, как и при проведении экспериментов с чистым трубопроводом. Следует отметить, что выбранные уклоны 0,5 и 1 % близки к реальным. При выполнении экспериментов расход изменялся от 3,86 до 21,97 л/с при уклоне  $i = 0,005$  и от 3,89 до 24,75 л/с при уклоне  $i = 0,01$ . В процессе экспериментальных исследований замерялось изменение глубины по длине потока электронным шпигунмаштабом с точностью измерений до 0,01 мм, что позволило установить длину начального участка с неравномерным движением. Поскольку испытуемый трубопровод имеет значительную шероховатость, длина начального участка невелика и не превышает  $15d$ . На достаточном удалении от начального сечения течение может считаться стабилизировавшимся. Для расчета гидравлического сопротивления был выбран створ с равномерным движением, в котором не наблюдается влияние начальных возмущений, а также влияние выходного участка. С целью контроля полу-

<sup>4</sup> HM162. Experimental flume 309 × 450 mm / U. Linke. Hamburg : G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 2013. 52 p.

<sup>5</sup> Паспорт государственного эталона единицы объема жидкости в диапазоне значений объемного расхода от 0 до 130 м<sup>3</sup>/ч № ЛПГ-0001. М. : МГСУ, 2017.

ченных результатов в расчетном створе также производились замеры скорости потока микровертушкой<sup>6</sup> [26].

При проведении гидравлических расчетов открытых каналов в мировой практике достаточно часто используется формула Шези для установления пропускной способности:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — площадь живого сечения потока;  $C$  — коэффициент Шези;  $R$  — гидравлический радиус;  $i$  — гидравлический уклон.

Для определения коэффициента Шези существует множество эмпирических формул, наибольшее распространение получила формула Маннинга, которая и была использована в настоящей работе:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (2)$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости по Маннингу.

Также коэффициент Шези можно получить, зная величину коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$ , используя зависимость между ними:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (3)$$

При осуществлении экспериментов значение коэффициента гидравлического сопротивления вы-

являлось с помощью зависимостей (1) и (3) следующим образом:

$$\lambda = \frac{8gRi}{V}. \quad (4)$$

Гидравлический радиус  $R$  и площадь живого сечения потока  $\omega$  определялись в зависимости от наполнения трубопровода  $h/d$  по номограммам<sup>7</sup>. Применяя величину расхода, установленного по показаниям высокоточного электромагнитного расходомера, а также рассчитанного по наполнению трубопровода значения площади живого сечения, определялась средняя скорость потока:

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (5)$$

Таким образом, по приведенным выше зависимостям (1)–(5) установлены величины коэффициента шероховатости  $n$  по Маннингу для всех рассмотренных условий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения глубины по длине потока в трубопроводе с имитацией частичного заиливания для различных наполнений с уклоном  $i = 0,005$  представлены на рис. 4, а для уклона  $i = 0,01$  на рис. 5.

Данные экспериментальных измерений по наполнению трубопровода приведены в таблице и на рис. 5.

<sup>6</sup> СТО 4.2-2-2014. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Градуировка регулирующих сооружений. Новочеркасск : РосНИИПМ, 2014. 55 с.

<sup>7</sup> Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л. : Стройиздат, 1973. 408 с.

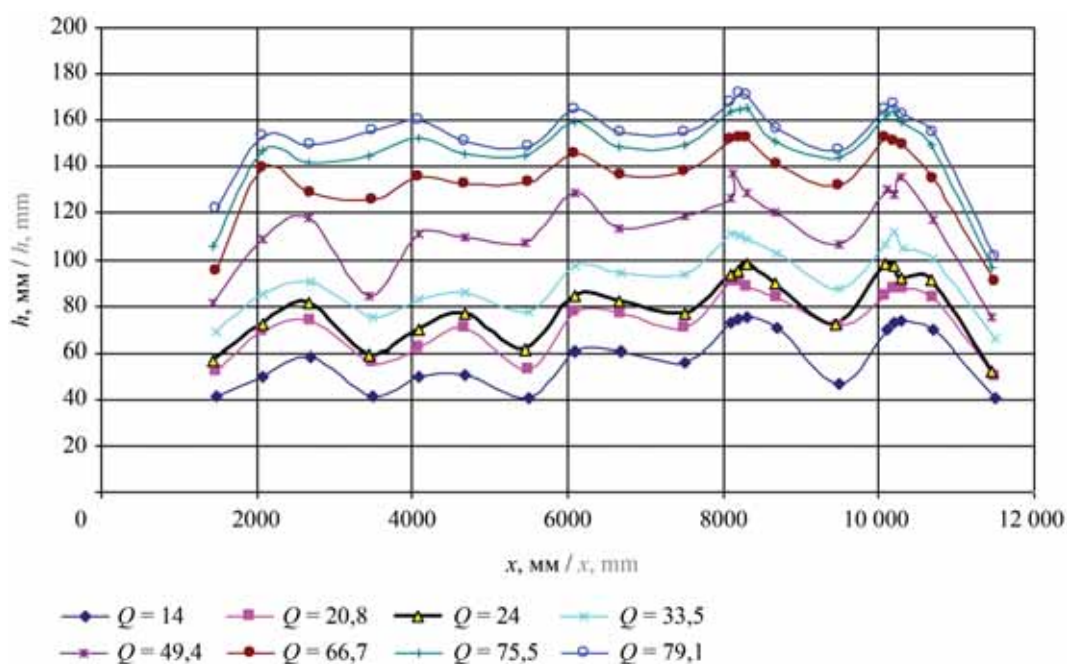


Рис. 4. Изменение глубины потока по длине трубопровода для уклона  $i = 0,005$ . Расход представлен в  $\text{м}^3/\text{ч}$

Fig. 4. Changes in the flow depth along the length of the pipeline for the slope  $i = 0.005$ . The flow rate is presented in  $\text{m}^3/\text{h}$

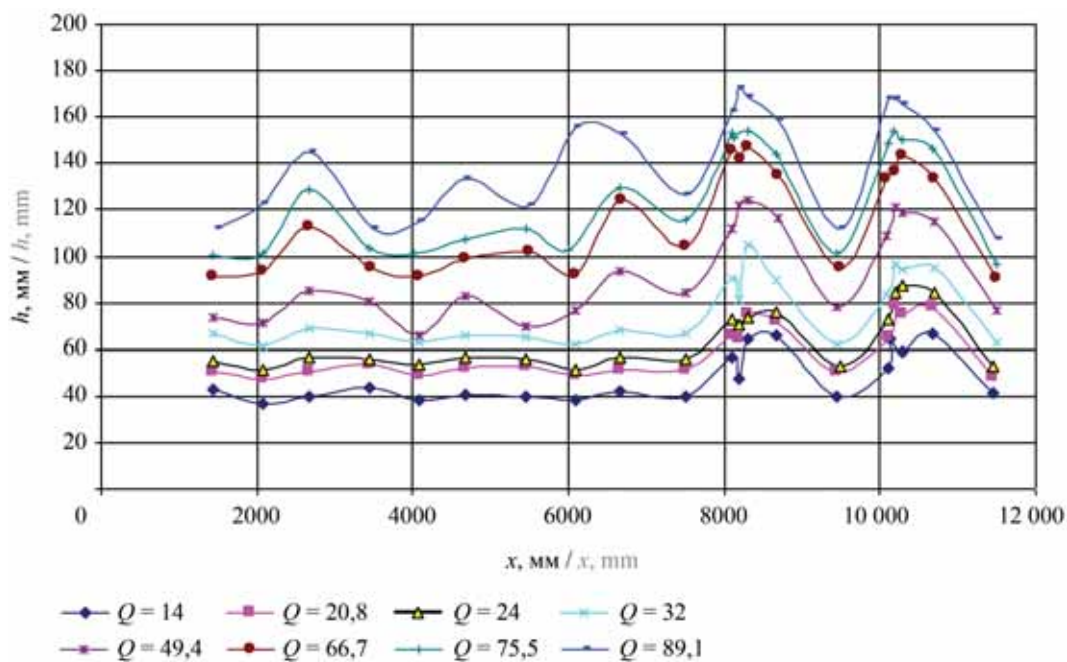


Рис. 5. Изменение глубины потока по длине трубопровода для уклона  $i = 0,01$ . Расход представлен в  $\text{м}^3/\text{ч}$

Fig. 5. Change in the flow depth along the length of the pipeline for the slope  $i = 0.01$ . The flow rate is presented in  $\text{m}^3/\text{h}$

Экспериментальные значения и гидравлические характеристики для трубопровода с частичным заиливанием  
The experimental values and the hydraulic characteristics of pipe with a partial silting

| $i$   | $Q, \text{м}^3/\text{ч} / \text{м}^3/\text{h}$ | $h, \text{мм} / \text{mm}$ | $h/d$ | $V, \text{м/с} / \text{m/s}$ | $\lambda$ | $R, \text{м} / \text{m}$ | $C$   | $n$   | $Re$    |
|-------|------------------------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------|-----------|--------------------------|-------|-------|---------|
| 0,005 | 13,9                                           | 73                         | 0,32  | 0,35                         | 0,1297    | 0,0405                   | 24,38 | 0,024 | 56 700  |
| 0,005 | 20,8                                           | 88,5                       | 0,39  | 0,40                         | 0,1136    | 0,0473                   | 26,27 | 0,023 | 76 356  |
| 0,005 | 33,5                                           | 109                        | 0,48  | 0,50                         | 0,085     | 0,0540                   | 30,32 | 0,020 | 107 568 |
| 0,005 | 66,5                                           | 152                        | 0,68  | 0,64                         | 0,063     | 0,0658                   | 35,10 | 0,018 | 168 480 |
| 0,005 | 24,0                                           | 96                         | 0,43  | 0,40                         | 0,1214    | 0,0495                   | 25,39 | 0,024 | 79 200  |
| 0,005 | 49,4                                           | 131                        | 0,58  | 0,58                         | 0,072     | 0,0608                   | 33,02 | 0,019 | 139 725 |
| 0,005 | 75,5                                           | 164                        | 0,73  | 0,69                         | 0,056     | 0,0675                   | 37,31 | 0,017 | 184 950 |
| 0,005 | 79,1                                           | 168                        | 0,75  | 0,69                         | 0,0556    | 0,0675                   | 37,62 | 0,017 | 186 300 |
| 0,01  | 66,7                                           | 142                        | 0,63  | 0,70                         | 0,1018    | 0,0636                   | 27,60 | 0,023 | 177 975 |
| 0,01  | 75,5                                           | 152                        | 0,68  | 0,72                         | 0,0996    | 0,0658                   | 28,18 | 0,023 | 189 540 |
| 0,01  | 49,4                                           | 118                        | 0,52  | 0,66                         | 0,103     | 0,0574                   | 27,73 | 0,022 | 151 470 |
| 0,01  | 14,0                                           | 57,4                       | 0,26  | 0,47                         | 0,1199    | 0,0338                   | 25,37 | 0,022 | 63 450  |
| 0,01  | 24,0                                           | 77                         | 0,34  | 0,58                         | 0,098     | 0,0422                   | 28,17 | 0,021 | 97 875  |
| 0,01  | 20,8                                           | 71                         | 0,31  | 0,56                         | 0,097     | 0,0388                   | 28,39 | 0,020 | 86 940  |
| 0,01  | 32,0                                           | 93                         | 0,41  | 0,59                         | 0,109     | 0,0484                   | 26,77 | 0,023 | 114 165 |
| 0,01  | 89,1                                           | 169                        | 0,75  | 0,78                         | 0,087     | 0,0675                   | 29,97 | 0,021 | 210 600 |

Сравнение результатов по изменению глубины потока по длине трубопровода с частичным заиливанием с результатами, полученными при экспериментах с чистым трубопроводом [26], показало, что наполнение трубопровода при частичном заиливании в пределах гофра слабо влияет на глубину потока в трубопроводе, который остается близким к наполнению трубы при отсутствии заиливания. Изменение

экспериментальных значений средней скорости в зависимости от расхода для различных уклонов показано в таблице и на рис. 6.

Экспериментальные данные по связи средней скорости потока с расходом, приведенные на рис. 7, показывают, что скорость практически линейно возрастает с расходом и увеличивается с ростом уклона.

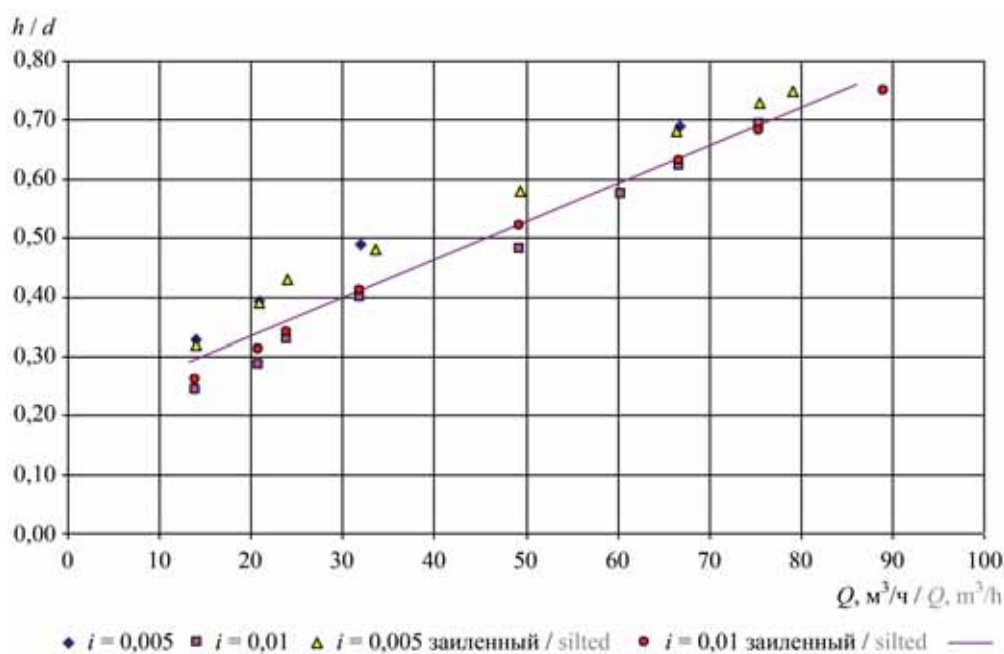


Рис. 6. Изменение наполнения трубопровода в зависимости от расхода при различных уклонах  $h/d = f(Q)$

Fig. 6. Changes in the filling of the pipeline depending on the flow rate at different slopes

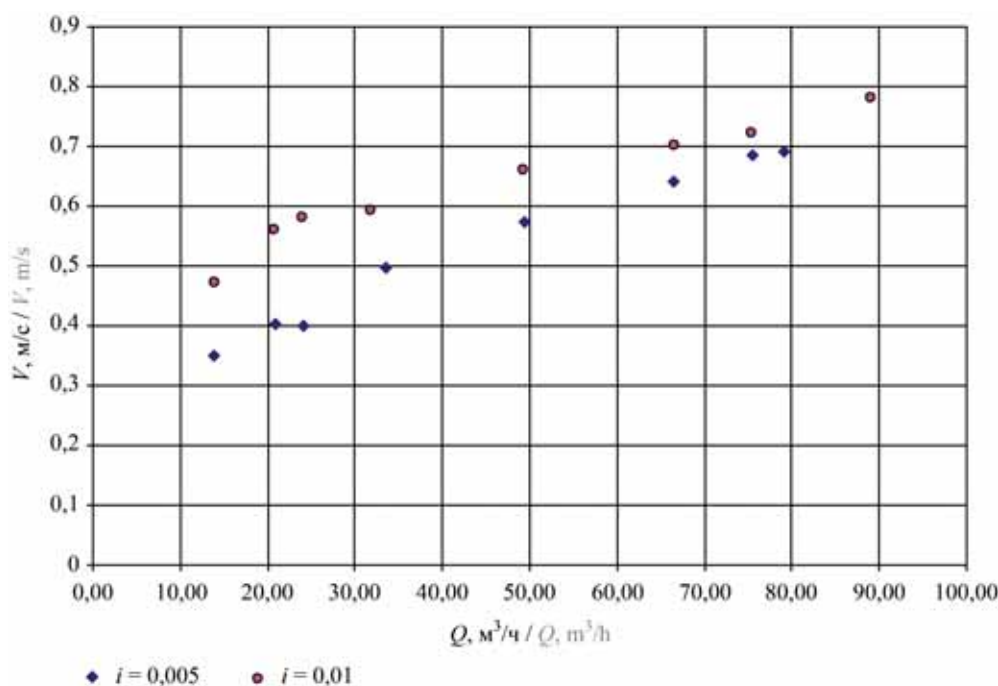


Рис. 7. Изменение средней скорости в зависимости от расхода для различных уклонов в трубопроводе с частичным заиливанием

Fig. 7. Changes in the average speed as a function of flow rate for different slopes in a partially silted pipeline

Сопоставление экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе (рис. 8) демонстрирует, что они практически не различаются.

Полученное в результате экспериментов значение шероховатости по Маннингу для чистого трубопровода и с имитацией частичного заиливания приведено на рис. 9.

Из сопоставления экспериментальных данных видно, что значение шероховатости практически

не обнаруживает влияния уклона, наполнения и частичного заиливания трубопровода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований для трубопроводов системы АСО Qmax с частичным заиливанием нижней части гофра в пределах лотковой части получено значение коэффициента шероховатости по Маннингу, равное

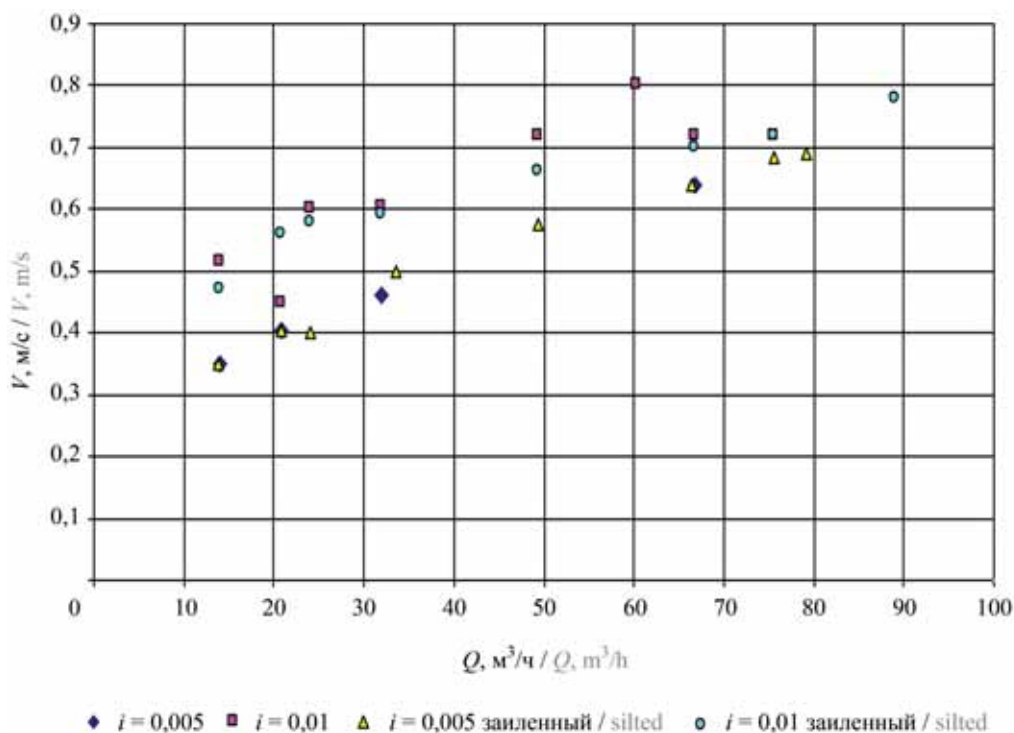


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе

Fig. 8. Comparison of experimental values of the average flow velocity in silted and non-silted pipelines

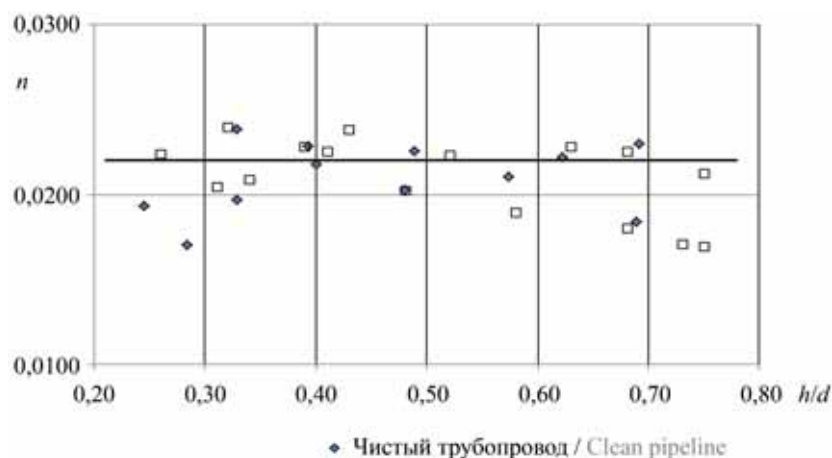


Рис. 9. Изменение шероховатости в зависимости от наполнения трубопровода

Fig. 9. Changes in roughness depending on the filling of the pipeline

0,022–0,024. Несмотря на то что частичное заиливание и сглаживание шероховатости нижней части гофра могло бы привести к уменьшению гидравлического сопротивления трубопровода, значения коэффициента шероховатости оказались близкими к значениям, полученным для трубопровода без заиливания [26]. Согласно справочным данным<sup>8</sup>, такое значение коэффициента шероховатости близко к значениям, соответствующим шероховатости земляных каналов. По-

<sup>8</sup> Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.

лученные значения коэффициента шероховатости по Маннингу соответствуют значениям коэффициента гидравлического сопротивления порядка 0,1.

Сопоставление полученных значений шероховатости для частично заиленного и чистого трубопровода системы АСО Qmax позволяет сделать вывод о том, что коэффициент шероховатости можно принять постоянным вне зависимости от занесения нижней части трубопровода неразмываемым осадком.

Таким образом, результаты исследований показали, что частичное заиливание трубопровода не оказывает влияния на его пропускную способность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ильина С.И., Рожкова И.В., Жарков С.А. К расчету коэффициента трения в полимерных трубопроводах // Успехи в химии и химической технологии. 2011. Т. 25. № 1 (117). С. 91–93.
2. Отставнов А.А., Примин О.Г., Хренов К.Е., Орлов В.А., Харькин В.А. К выбору ПЭ-труб для наружных сетей // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2012. № 8 (128). С. 18–23.
3. Верещагина Л.М., Тен А.Э., Громов Г.Н., Худякова Д.Д. Методика гидравлического расчета инновационных конструкций системы отвода поверхностных сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 8. С. 56–61. DOI: 10.35776/MNP.2019.08.06
4. Отставнов А.А., Ионов В.С. К вопросу общего подхода к гидравлическим расчетам трубопроводов внутреннего водоснабжения и водяного отопления из металла и полимера // Сантехника. 2003. № 5. С. 42–46.
5. Castro-Ortiz O., Hager W.H. Joseph Boussinesq and his theory of water flow in open channels // Journal of Hydraulic Research. 2011. Vol. 49. Issue 5. Pp. 569–577. DOI: 10.1080/00221686.2011.588784
6. Wang N., You S., Wang Y., Zhang H., Miao Q., Zheng X. et al. Hydraulic resistance identification and optimal pressure control of district heating network // Energy and Buildings. 2018. Vol. 170. Pp. 83–94. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.003
7. Arifjanov A., Rakhimov Q., Samiev L., Abduraimova D., Apakhodjaeva T. Hydraulic friction coefficient at hydraulic mixing movement in pressure pipelines // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020. Vol. 12. Issue SP7. Pp. 1332–1336. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP7/20202233
8. Stewart M.T., Cameron S.M., Nikora V.I., Zampiron A., Marusic I. Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds // Journal of Hydraulic Research. 2019. Vol. 57. Issue 2. Pp. 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296
9. Sukharev M.G., Karasevich A.M., Samoilov R.V., Tverskoi I.V. Investigation of the hydraulic resistance in polyethylene pipelines // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005. Vol. 78. Issue 2. Pp. 350–359. DOI: 10.1007/s10891-005-0068-8
10. Прокопс О.А., Терехов Л.Д. Гидравлические характеристики раструбных труб из ВЧШГ с полиуретановым покрытием внутренней поверхности // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 5. С. 53–57.
11. Прокопс О.А. Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 11. С. 60–64.
12. Митрахович А.И., Макоед В.М., Лавушев С.М., Сергеев А.П. Условия применения двухслойных гофрированных полиэтиленовых труб «Корсис» на мелиоративных объектах // Мелиорация. 2020. № 1 (91). С. 15–23.
13. Al-Mahfooz M.J., Mahdi E. Bending behavior of glass fiber reinforced composite overwrapping pvc plastic pipes // Composite Structures. 2020. Vol. 251. P. 112656. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112656
14. Прокопс О.А., Терехов Л.Д., Смолин Е.С. Анализ зарубежных и отечественных расчетных зависимостей для определения потерь напора в трубопроводах из полимерных материалов // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 56–60.
15. Bozorov O.S., Khujayev I.Q., Mamatqulova M.S. Distribution of the impulse in pipelines with irregularly distributed hydraulic resistance // Theoretical & Applied Science. 2018. Vol. 66. Issue 10. Pp. 54–57. DOI: 10.15863/TAS.2018.10.66.8
16. Gersten K., Papenfuss H.-D., Kurschat T., Genillon P. New transmission-factor formula proposed for gas pipelines // Oil and Gas Journal. 2000. Vol. 98. Issue 7. Pp. 58–62.
17. Fournier A., Kuper W. Determining actual wall roughness from operational data. N.V. Nederlandse Gasunie, 1994 (paper for PSIG meeting 1994). URL: <http://www.psig.org/Papers/archive.asp year=1994>
18. Altunin V., Chernykh O. Hydraulic resistance of a heliably corrugated metal pipe culvert // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 2. Pp. 125–129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0

19. Bossinov D.Zh., Zhabbasbaev U.K. About one inverse problem on determination the hydraulic resistance of the pipeline // *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*. 2019. Vol. 102. Issue 2. DOI: 10.26577/jmmcs-2019-2-24

20. Covas D., Stoianov I., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I — experimental analysis and creep characterization // *Journal of Hydraulic Research*. 2004. Vol. 42. Issue 5. Pp. 517–532. DOI: 10.1080/00221686.2004.9641221

21. Айда-Заде К.Р., Кулиев С.З. Задача идентификации коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода // *Автоматика и телемеханика*. 2016. № 7. С. 123–141.

22. Остякова А.В. Гидравлическое сопротивление речного русла на начальной стадии формирования рельефа дна // *Научное обозрение*. 2016. № 1. С. 259–265.

23. Zlobin A.V., Tarasevich S. Hydraulic resistance of pipes with uniform continuous roughness in the form of a metric thread of varying profile and an inserted twisted tape // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. Issue 5. Pp. 1226–1232. DOI: 10.1007/s10891-020-02225-1

24. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 373. Pp. 33–79. DOI: 10.1017/s0022112098002419

25. Брянская Ю.В., Байков В.Н., Волинов М.А. Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление при течении в трубах, каналах и речных руслах // *Гидротехническое строительство*. 2011. № 3. С. 37–39.

26. Bryanskaya Yu.V., Dzhumagulova N.T. Experimental determination of hydraulic characteristics of corrugated pipeline // *Power Technology and Engineering*. 2020. Vol. 54. Issue 1. Pp. 28–31. DOI: 10.1007/s10749-020-01161-7

Поступила в редакцию 1 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 30 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 1 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Эдисович Тен — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ten\_ae@mosvodokanal.ru;

Назира Тентимишовна Джумагулова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 311480; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6392-7447, РИНЦ ID: 280769, ResearcherID: AAE-7741-2020, Scopus: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Il'ina S.I., Rozhkova I.V., Zharkov S.A. To calculate the coefficient of friction in polymer pipelines. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2011; 25(1):(117):91-93. (rus.).

2. Otstavnov A.A., Primin O.G., Khrenov K.E., Orlov V.A., Khar'kin V.A. To the choice of PE pipes for outdoor networks. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2012; 8(128):18-23. (rus.).

3. Vereshchagina L., Ten A., Gromov G., Khudjakova D. Method of hydraulic calculation of the innovative designs of surface runoff disposal. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 8:56-61. DOI: 10.35776/MNP.2019.08.06 (rus.).

4. Otstavnov A.A., Ionov V.S. On the issue of a general approach to hydraulic calculations of internal water supply and water heating pipelines made of metal and polymer. *Plumbing*. 2003; 5:42-46. (rus.).

5. Castro-Orgaz O., Hager W.H. Joseph Bousinesq and his theory of water flow in open channels. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(5):569-577. DOI: 10.1080/00221686.2011.588784

6. Wang N., You S., Wang, Y., Zhang H., Miao Q., Zheng X. et al. Hydraulic resistance identification and optimal pressure control of district heating network. *Energy and Buildings*. 2018; 170:83-94. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.003

7. Arifjanov A., Rakhimov Q., Samiev L., Abduraimova D., Apakhodjaeva T. Hydraulic friction coefficient at hydraulic mixing movement in pressure pipelines. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020; 12(SP7):1332-1336. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP7/20202233

8. Stewart M.T., Cameron S.M., Nikora V.I., Zampiron A., Marusic I. Hydraulic resistance in

open-channel flows over self-affine rough beds. *Journal of Hydraulic Research*. 2019; 57(2):183-196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296

9. Sukharev M.G., Karasevich A.M., Samoilov R.V., Tverskoi I.V. Investigation of the Hydraulic Resistance in Polyethylene Pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005; 78(2):350-359. DOI: 10.1007/s10891-005-0068-8

10. Prodous O.A., Terekhov L.D. Hydraulic characteristics of high-pressure bell pipes with polyurethane coating on the inner surface. *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2017; 5:53-57. (rus.).

11. Prodous O.A. Predicting head loss in pipelines made of different polymer materials. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 11:60-64. (rus.).

12. Mittrakhovich A.I., Makoed V.M., Lavushev S.M., Sergeenya A.P. Conditions of application of two-layer corrugated polyethylene pipes “Corsis” on meliorative objects. *Melioration*. 2020; 1(91):15-23. (rus.).

13. Al-Mahfooz M.J., Mahdi E. Bending behavior of glass fiber reinforced composite overwrapping PVC plastic pipes. *Composite Structures*. 2020; 251:112656. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112656

14. Prodous O.A., Terekhov L.D., Smolin E.S. Analysis of foreign and domestic dependencies for determining pressure losses in pipelines made of polymer materials. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 1:56-60. (rus.).

15. Bozorov O.S., Khujaev I.Q., Mamatqulova M.S. Distribution of the impulse in pipelines with irregularly distributed hydraulic resistance. *Theoretical & Applied Science*. 2018; 66(10):54-57. DOI: 10.15863/TAS.2018.10.66.8

16. Gersten K., Papenfuss H.-D., Kurschat T., Genillon P. New transmission-factor formula proposed for gas pipelines. *Oil and Gas Journal*. 2000; 98(7):58-62.

17. Fournier A., Kuper W. *Determining actual wall roughness from operational data. N.V. Nederlandse Gasunie, 1994 (paper for PSIG meeting 1994).* <http://www.psig.org/Papers/archive.asp year=1994>

18. Altunin V., Chernykh O. Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(2):125-129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0

19. Bossinov D.Zh., Zhabbasbaev U.K. About one inverse problem on determination the hydraulic resistance of the pipeline. *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*. 2019; 102(2). DOI: 10.26577/jmmcs-2019-2-24

20. Covas D., Stoianov I., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I — experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Research*. 2004; 42(5):517-532. DOI: 10.1080/00221686.2004.9641221

21. Ayda-Zade K.R., Kuliye S.Z. Hydraulic resistance coefficient identification in pipelines. *Automation and Telemechanics*. 2016; 7:123-141. (rus.).

22. Ostyakova A.V. Hydraulic resistance of the river bed at the initial stage of bottom relief formation. *Science Review*. 2016; 1:259-265. (rus.).

23. Zlobin A.V., Tarasevich S. Hydraulic resistance of pipes with uniform continuous roughness in the form of a metric thread of varying profile and an inserted twisted tape. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020; 93(5):1226-1232. DOI: 10.1007/s10891-020-02225-1

24. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998; 373:33-79. DOI: 10.1017/s0022112098002419

25. Bryanskaya Yu.V., Baykov V.N., Volynov M.A. Velocity distribution and hydraulic resistance during flow in pipes, channels and riverbeds. *Power Technology and Engineering*. 2011; 3:36-39. (rus.).

26. Bryanskaya Yu.V., Dzhumagulova N.T. Experimental determination of hydraulic characteristics of corrugated pipeline. *Power Technology and Engineering*. 2020; 54(1):28-31. DOI: 10.1007/s10749-020-01161-7

Received March 1, 2021.

Adopted in revised form on March 30, 2021.

Approved for publication on April 1, 2021.

**BIONOTES:** **Andrey E. Ten** — postgraduate student of the Department of Water supply and sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; [ten\\_ae@mosvodokanal.ru](mailto:ten_ae@mosvodokanal.ru);

**Nazira T. Dzhumagulova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 311480; [mgsu-hydraulic@yandex.ru](mailto:mgsu-hydraulic@yandex.ru);

**Yuliya V. Bryanskaya** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 6392-7447, ID RSCI: 280769, ResearcherID: AAE-7741-2020, Scopus: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690; [mgsu-hydraulic@yandex.ru](mailto:mgsu-hydraulic@yandex.ru).

## Вакуумирование активного ила как способ интенсификации процессов его седиментации

А.А. Кулаков<sup>1</sup>, А.Ф. Филатова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия;

<sup>3</sup> Правительство Вологодской области; г. Вологда, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Иловая смесь сооружений с удалением азота характеризуется высоким содержанием нитратов и растворенного кислорода на входе во вторичный отстойник. В толще осадка вторичных отстойников создаются условия снижения содержания кислорода, протекают процессы неконтролируемой денитрификации. Это приводит к всплыванию и выносу ила из сооружений, вторичному загрязнению очищенной воды. Цель работы — изучение параметров седиментации активного ила городских канализационных очистных сооружений и их интенсификации за счет вакуумирования.

**Материалы и методы.** Исследования проведены в лабораторных условиях. Моделировался процесс вакуумирования и седиментации иловой смеси. Построены графики снижения границы раздела фаз «ил – вода» (кривые Кинша). Проведена математическая и графическая обработка полученных результатов.

**Результаты.** Рассмотрены работа блока биологической очистки городских сточных вод (аэротенк — вторичный отстойник) и методы интенсификации его функционирования за счет воздействия на активный ил. Экспериментально получены закономерности седиментации иловой смеси городских канализационных очистных сооружений при разной дозе. Исследован процесс вакуумирования иловой смеси, определена эффективность процесса в зависимости от продолжительности обработки.

**Выводы.** Вакуумирование позволяет удалить из жидкости газы, что ускоряет процесс отделения ила от очищенной воды, предотвращает его всплывание на поверхность. Обработанная проба характеризуется лучшими седиментационными характеристиками, плотностью и крупностью хлопьев, а также их целостностью. Оптимальная продолжительность вакуумирования иловой смеси перед отстаиванием составляет 0,5 минут, дает возможность ускорять процессы последующей седиментации и сократить вынос ила с очищенной водой. Полученные результаты лабораторных испытаний могут быть применены при проектировании узла вакуумирования иловой смеси перед вторичными отстойниками и при ее илоразделении.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** активный ил, седиментация, вакуумирование, доза ила, канализационные очистные сооружения, вторичный отстойник

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кулаков А.А., Филатова А.Ф. Вакуумирование активного ила как способ интенсификации процессов его седиментации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 370–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.370-380

## Intensification of activated sludge sedimentation processes by means of vacuuming

Artem A. Kulakov<sup>1</sup>, Alina F. Filatova<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA); Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation;

<sup>3</sup> Government of the Vologda Region; Vologda, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The mixed liquor of nitrogen removal wastewater treatment plants is characterized by a high concentration of nitrates and dissolved oxygen at the inlet to the secondary settling tank. In the sludge layer of secondary sedimentation tanks, conditions of decreased oxygen content and uncontrolled denitrification processes take place. This leads to the floating up and removal of sludge with the effluent and secondary pollution of treated water. The purpose of this article is to study the parameters of activated sludge sedimentation in municipal wastewater treatment plants and their intensification by means of vacuuming.

**Materials and methods.** The studies were carried out under laboratory conditions. Activated sludge vacuuming and sedimentation processes were simulated. Diagrams of the “sludge-water” phase reduction (Kinsh curves) were drawn. Mathematical and graphic processing of the results was carried out.

**Results.** Biological treatment of municipal wastewater (aerotank — secondary settling tank) and methods of its intensification by influencing the activated sludge were considered in this article. Trends of activated sludge (at different concentrations of mixed liquor suspended solids) sedimentation were experimentally obtained for municipal wastewater treatment plants. The process of sludge vacuuming was researched, the process efficiency was determined as a function of the treatment time.

**Conclusions.** Vacuuming allows removing gases from the fluid, which accelerates the process of sludge separation from the treated water and prevents it from floating to the surface. The treated sample is characterized by better sedimentation characteristics, density, coarseness and integrity of flakes. The optimal duration of mixed liquor vacuuming before sedimentation is 0.5 minutes; this accelerates the processes of subsequent sedimentation and reduces the removal of sludge with treated water. The results of laboratory tests can be applied to the design of the mixed liquor vacuuming unit before the secondary sedimentation tanks and its sludge separation.

**KEYWORDS:** activated sludge, sedimentation, vacuuming, sludge dose, wastewater treatment plants, secondary sedimentation tank

**FOR CITATION:** Kulakov A.A., Filatova A.F. Intensification of activated sludge sedimentation processes by means of vacuuming. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):370-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.370-380 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Биологическая очистка — наиболее распространенный и эффективный метод очистки городских сточных вод. Реализация технологий глубокого удаления азота и фосфора позволяет достичь природоохранных нормативов. Однако работа блока биологической очистки может нарушаться при колебаниях гидравлической и массовой нагрузки. Наибольшему влиянию подвержены вторичные отстойники, изменения нагрузки на которые приводят к неконтролируемым процессам в толще ила [1].

Иловая смесь, поступающая во вторичные отстойники сооружений с удалением азота, после глубокой нитрификации в аэробных зонах содержит большое количество нитратов. В толще отстойников при снижении содержания растворенного кислорода протекает выделение газообразного азота. Пузырьки азота поднимают на поверхность хлопья ила, что влечет за собой нарушение технологического режима. Этот неконтролируемый процесс ведет к выносу ила из системы и вторичному загрязнению очищенной воды.

На практике существуют решения интенсификации процессов илоразделения, среди которых наибольшее распространение получили тонкослойное отстаивание и мембранные биореакторы [2–5]. При этом решение может приводить к обрастанию пластин тонкослойного модуля, снижению эффективности седиментации и вторичному загрязнению в периоды отрыва частиц ила. Мембранные технологии имеют высокую эффективность, но сопряжены с дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами.

В статье рассмотрен метод вакуумирования иловой смеси перед илоразделением, как эффективный инструмент повышения окислительной мощности биологических сооружений и снижения гидравлической нагрузки на поверхность вторичного отстойника.

Настоящая работа направлена на исследование влияния процесса вакуумирования (дегазации) на седиментацию иловой смеси городских очистных сооружений.

Блок биологической очистки включает резервуары биологической очистки (анаэробные, аноксидные, аэробные) и узел илоразделения (вторичный

отстойник, мембранный блок). Расчет этих сооружений ведется по следующим основным параметрам:

- биологические сооружения — расход сточных вод, содержание загрязняющих веществ (химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК), азот, фосфор), возраст, доза ила, параметры системы аэрации;
- узел илоразделения (вторичный отстойник) — нагрузка на поверхность, допустимый вынос взвешенных веществ, осаждаемость ила.

Величина расхода оказывает прямое влияние на работоспособность, но не является управляемой величиной. Повышение дозы ила и ухудшение седиментационных свойств (увеличение илового индекса) увеличивают нагрузку на отстойник. Данные параметры являются косвенными и поддаются управлению.

Осаждаемость ила — один из наиболее важных параметров, влияющих на работу блока биологической очистки. Иловый индекс не дает полной картины седиментационных характеристик ила. Для получения достоверной информации, которая может использоваться при проектировании и эксплуатации, рекомендуется строить кривые снижения границы раздела фаз ила и воды [6–8], которые показывают динамику осаждения. Теория массового потока [9, 10] может быть основой для расчета поверхностной нагрузки на вторичные отстойники.

Нагрузка на поверхность вторичного отстойника определяется по формуле:

$$q_{ssa} = \frac{4,5 K_{ss} H_{set}^{0,8}}{(0,1 J_i a_i)^{0,5-0,01 a_i}},$$

где  $q_{ssa}$  — гидравлическая нагрузка, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $K_{ss}$  — коэффициент использования объема зоны отстаивания;  $H_{set}$  — глубина зоны отстаивания, м;  $J_i$  — иловый индекс, см<sup>3</sup>/г;  $a_i$  — концентрация активного ила в аэротенке (доза ила), г/л;  $a_i$  — расчетный вынос взвешенных веществ, мг/л.

Состав поступающих сточных вод, кислородные условия в технологических зонах, нагрузки на биомассу, гидравлические характеристики потока оказывают влияние на эффективность и надежность блока биологической очистки [7, 10–13]. При этом различие нагрузок на смежные секции может быть

следствием формирования биоценозов с различными характеристиками.

Одним из результатов нарушения работы биологических сооружений являются пенообразование и вспухание ила [14–16], которые приводят к нарушению процессов очистки и перегрузке вторичных отстойников. Контроль седиментационных характеристик ила и своевременное принятие технологических мер позволяют снизить риски нарушения работы блока биологической очистки.

Улучшение свойств ила может достигаться за счет выявления и устранения причин этого явления, в первую очередь, за счет увеличения концентрации активного ила в аэротенках, либо повышения аэробности системы.

Еще одна причина нарушения работы вторичных отстойников — неконтролируемая денитрификация в толще ила. Решение этой проблемы возможно путем управления величиной рециклов уровней ила во вторичном отстойнике, регулирования дозы и возраста ила, кислородного режима в аэробных сооружениях.

Направлениями интенсификации сооружений илоразделения могут быть:

- увеличение поверхности за счет больших размеров (условной поверхности за счет применения тонкослойных модулей);
- улучшение характеристик ила;
- гранулирование активного ила [17];
- дозирование реагентов в иловую смесь [18, 19];
- физическое воздействие на иловую смесь, в том числе дегазация (вакуумирование);
- мембранное илоразделение (не оказывает влияние на характеристики, интенсифицирует процесс отделения биомассы).

Увеличение площади отстаивания приводит к росту строительных объемов, капитальных и эксплуатационных затрат. Если рассматривать данный метод при реконструкции сооружений, то его применение может быть ограничено дефицитом площадей и сложностью модернизации имеющихся коммуникаций.

Применение тонкослойного отстаивания — пространственное решение как при первичном, так и при вторичном отстаивании. Но, если при первичном эффективность метода достаточно хорошо апробирована, то использование вторичных тонкослойных отстойников сопряжено с риском заиливания межполочного пространства и выносов ила с очищенной водой. Принцип основан на сокращении высоты слоя отстаивания и пути осаждения частицы, что приводит к снижению требуемых размеров отстойников.

Мембранные биореакторы (МБР) позволяют заменить вторичные отстойники микрофильтрационным или ультрафильтрационным мембранным модулем [2, 20, 21]. Это дает возможность сократить площадь и объем сооружений биологической очистки за счет увеличенной дозы ила (8–12 г/л взамен

2–5 г/л у традиционных аэротенков), а также создать условия для автоселекции биоценоза и исключить риск его выноса. Получаемый высокий возраст биомассы (до 20–40 суток) дополнительно интенсифицирует процессы удаления азота. Глубокое отделение биомассы за счет мембраны позволяет исключить сооружения доочистки. Реализация мембранных технологий при модернизации действующих сооружений зачастую разрешает избежать дополнительного строительства при росте производительности или эффективности.

Предварительная дегазация (вакуумирование) ила перед его подачей во вторичные отстойники способствует улучшению процесса осаждения. С помощью такого решения можно увеличить рабочую дозу ила до 6–7 г/л (за счет улучшенной седиментации и снижения нагрузки на поверхность вторичного отстойника) и сократить/оптимизировать требуемый объем реактора. Вакуумирование иловой смеси дает возможность повысить дозу возвратного ила, снизить риск его выноса с очищенной водой, сократить требуемое время для отстаивания. После дегазации иловой смеси отделение надильной воды протекает без образования частично осевшего и плавающего ила [22–25]. В процессе дегазации из иловой смеси «вытягивается» газ, например азот и кислород, что положительно сказывается на общей эффективности очистки. Возвратный ил в зону денитрификации поступает со сниженным кислородом, что ускоряет процессы денитрификации. Отделение свободного азота интенсифицирует эффективность очистки по нему.

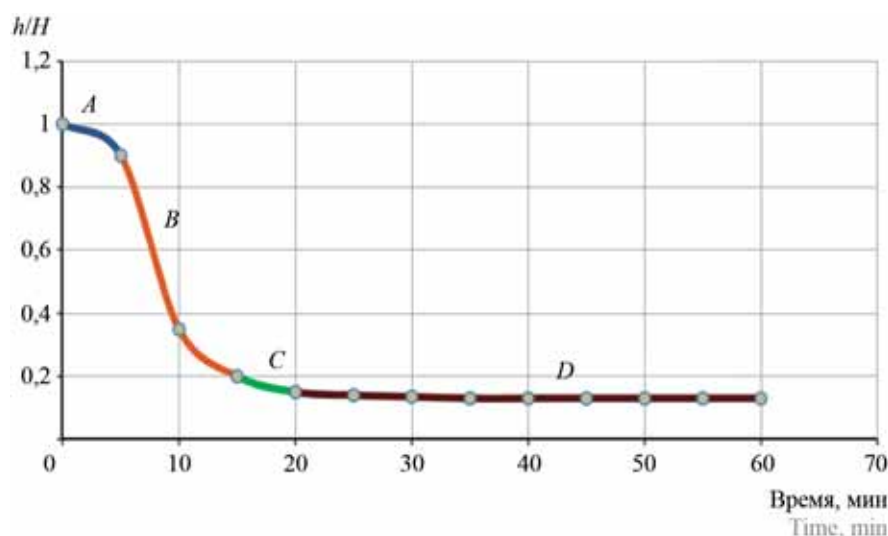
Основными преимуществами дегазации иловой смеси являются [23, 24, 26–28]: интенсификация биологических процессов в действующих объемах сооружений, простое обслуживание, низкие энергозатраты (0,02–0,03 кВт·ч/м<sup>3</sup>), использование имеющейся инфраструктуры, монтаж и запуск при действующих технологических процессах.

Применение гранулированного ила позволяет увеличить дозу ила до 10 г/л, оптимизировать объемы биологических реакторов и сооружений илоразделения, провести селекцию биоценоза [13, 17, 29]. В реакторах последовательного действия благодаря этой технологии обеспечивается стабильное протекание эффективных процессов удаления азота.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках экспериментальных исследований (на очистных сооружениях г. Вологды) определена кинетика осаждения иловой смеси до и после дегазации, выявлено влияние дегазации на седиментационные характеристики ила.

Важной задачей была оценка осаждаемости ила через построение кривой Кинша [30, 31] (кривой кинетики снижения границы раздела фаз), приведенной на рис. 1.

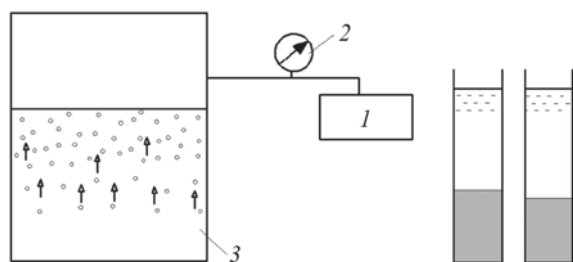


**Рис. 1.** Кривая кинетики разделения иловой смеси: *A* — зона флоккуляции хлопков активного ила; *B* — зона стесненного осаждения; *C* — переходная зона к уплотнению осевшего активного ила; *D* — зона уплотнения осевшего активного ила

**Fig. 1.** Separation kinetics curve for activated sludge: *A* — flocculation phase; *B* — zone settling phase; *C* — transition phase; *D* — compression phase

Отобранная из выхода аэротенков иловая смесь перемешивалась и вносилась в цилиндры объемом 1 л. Через заранее определенные промежутки времени устанавливалась граница раздела фаз «вода – ил», которая фиксировалась визуально и вносилась в таблицу. Далее данные интерпретировались графически.

Для оценки влияния дегазации иловую смесь подвергали обработке под вакуумом на установке (рис. 2).



**Рис. 2.** Установка дегазации (вакуумирования): 1 — вакуумный насос; 2 — вакуумметр; 3 — емкость дегазации

**Fig. 2.** Vacuuming device: 1 — vacuum pump; 2 — vacuum meter; 3 — vacuuming tank

Установка включала емкость дегазации с подключенным вакуумным насосом, а также вакуумметр для оценки создаваемого давления.

В качестве продолжительности дегазации выбраны временные интервалы: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 7 и 10 мин. Вакуум составлял 0,095 МПа.

При дегазации обеспечивалось частичное удаление растворенных газов под действием вакуума в верхней части емкости дегазации. Затем обрабо-

танная жидкость вносилась в цилиндры объемом 1 л и исследовалась на седиментацию для определения оптимальной продолжительности обработки. На рис. 3 приведена фотография лабораторной установки.



**Рис. 3.** Лабораторная установка дегазации (вакуумирования) иловой смеси

**Fig. 3.** Lab-scale device for activated sludge vacuuming

Для оценки седиментационных свойств необработанного ила изучались разные дозы ила в интервале от 6,2 до 0,6 г/л.

Прошедшая процесс дегазации иловая смесь, отобранная в конце коридора аэротенков, аэрировалась до установления постоянного значения концентрации растворенного кислорода (КРК), после чего в емкости с механическим перемешиванием измерялось снижение во времени КРК портативным анализатором (рис. 4).



Рис. 4. Определение концентрации растворенного кислорода

Fig. 4. Determination of dissolved oxygen concentration

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Результаты лабораторных исследований

Обработанные данные по седиментации ила приведены на рис. 5, 6. Выявлена зависимость осаждения ила от дозы ила на разных временных этапах.

По кривым осаждения были сравнены седиментационные свойства илов с дозами ила 5,6–0,6 г/л. Значения высоты столба иловой смеси после 180 мин

эксперимента нестабильны и варьируются в широком диапазоне — от 16 до 248 мм. При этом флокуляция хлопков ила при дозе 0,6 г/л происходит быстрее всего.

Для оценки эффективности дегазации исследована проба иловой смеси с дозой 5,6 г/л.

На рис. 7 показаны фотографии визуального эффекта от применения технологии дегазации иловой смеси в течение 1 и 2 мин, а также без обработки. Как видно на рис. 7, дегазация позволяет повысить эффективность седиментации.

При обработке данных, полученных экспериментальным путем, построены кривые осаждения после обработки иловой смеси для определения наилучшего времени дегазации (рис. 8).

Оптимальное время составило 0,5 и 2 мин. Дегазация в течение 2 мин дает высокий эффект, однако столь длительное время повлечет за собой конструкцию колонны больших объемов и высокие энергозатраты.

Динамика седиментации для обработанных проб схожая, однако при обработке в течение 0,5 и 2 мин скорости осаждения выше, что позволяет достичь меньшего объема ила после 30 мин отстаивания. Необработанная проба отличалась медленными скоростями осаждения и наличием растворенных газов, которые периодически приводили к всплыванию частиц ила.

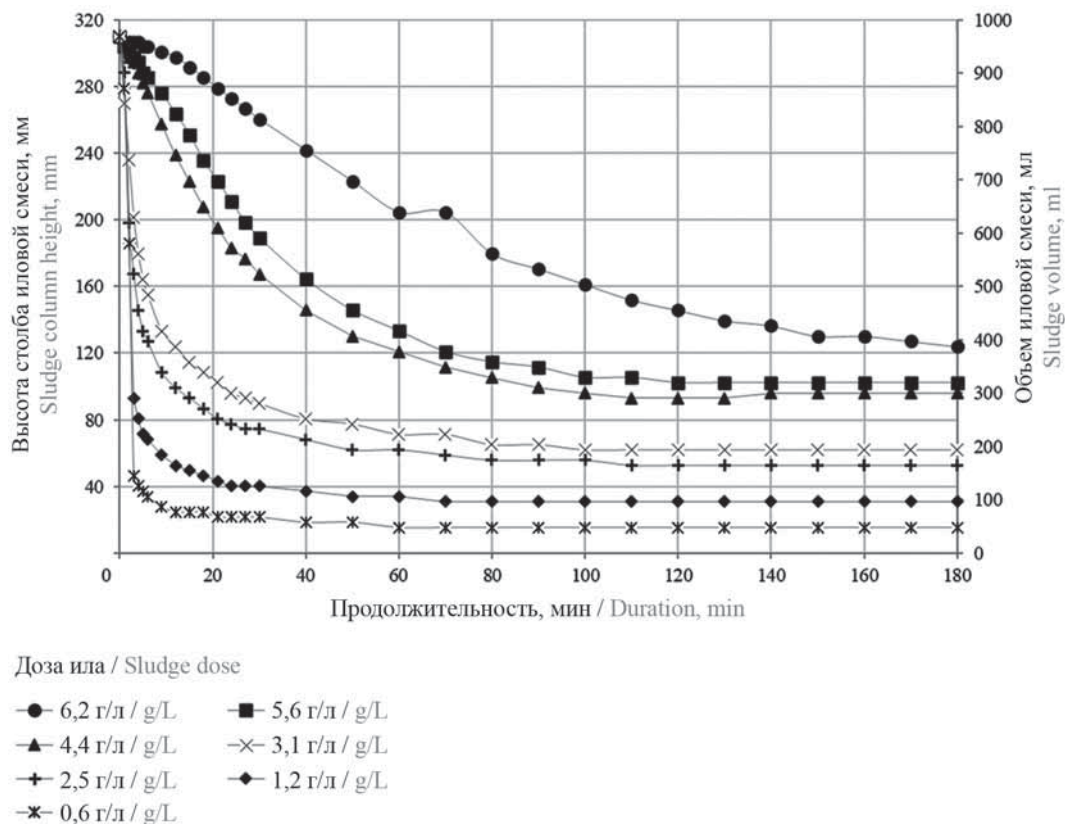


Рис. 5. Кривые кинетики снижения границы раздела «вода – ил»

Fig. 5. Kinetic curves of a decrease in the “water – sludge” boundary

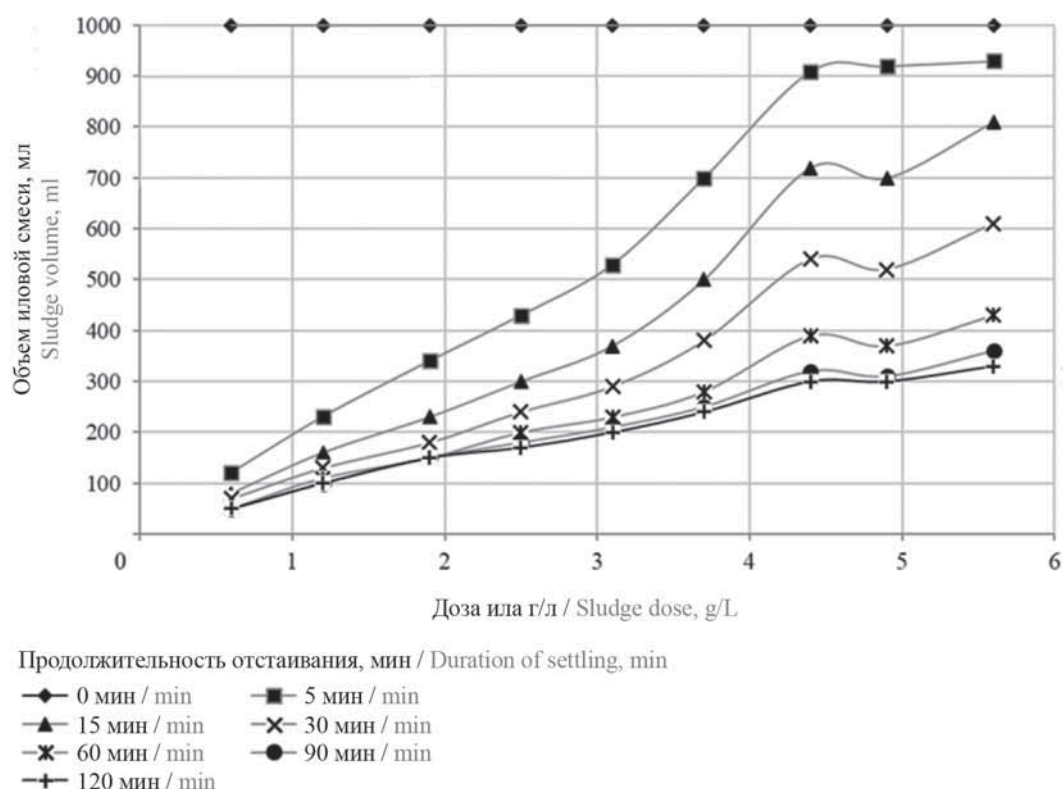


Рис. 6. Срез кинетики осаждения иловой смеси при разных дозах

Fig. 6. Kinetics of activated sludge sedimentation at different doses

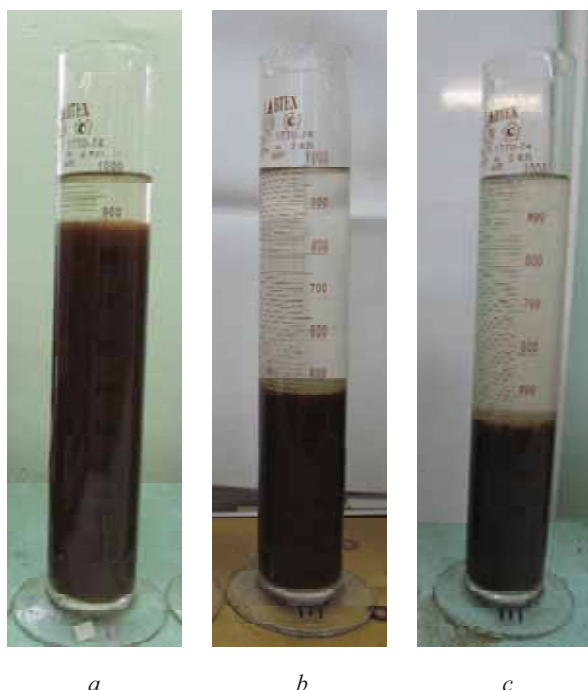


Рис. 7. Фотографии осаждения активного ила: а — без обработки; б — дегазация в течение 1 мин; с — в процессе дегазации в течение 2 мин)

Fig. 7. Photos of activated sludge sedimentation: а — untreated; б — vacuuming for 1 minute; с — vacuuming for 2 minutes

Дегазация дает возможность удалить из жидкости растворенные газы (в том числе газообразный азот), что способствует ускорению процесса отделения ила от очищенной воды, предотвращению неконтролируемой денитрификации в толще ила и его всплыванию на поверхность. Обработанная проба характеризуется лучшими седиментационными характеристиками, плотностью и крупностью хлопьев, а также их целостностью.

В процессе дегазации иловой смеси определялась КРК и сравнивалась со значениями КРК при дыхании ила необработанной пробы (рис. 9). На графике видно, как первые 50 с эксперимента происходит активная дегазация, т.е. постепенное вытягивание растворенного кислорода. Это — зона активной дегазации 1. Далее наблюдается небольшой спад снижения КРК в пробе с дегазацией. Здесь 2 — зона «заторможенной» активности, где кислород находится практически на одном уровне и значительно не изменяется. Затем появляется 3 зона — зона дыхания ила, где активная масса свободного кислорода практически вся «вытянута» из пробы. При этом график дыхания ила достаточно равномерный и имеет практически линейную зависимость.

#### Практическая применимость

В настоящее время вакуумирование иловой смеси перед вторичными отстойниками нашло практическое применение [13, 18]. Фотография колонны дегазации представлена на рис. 10.

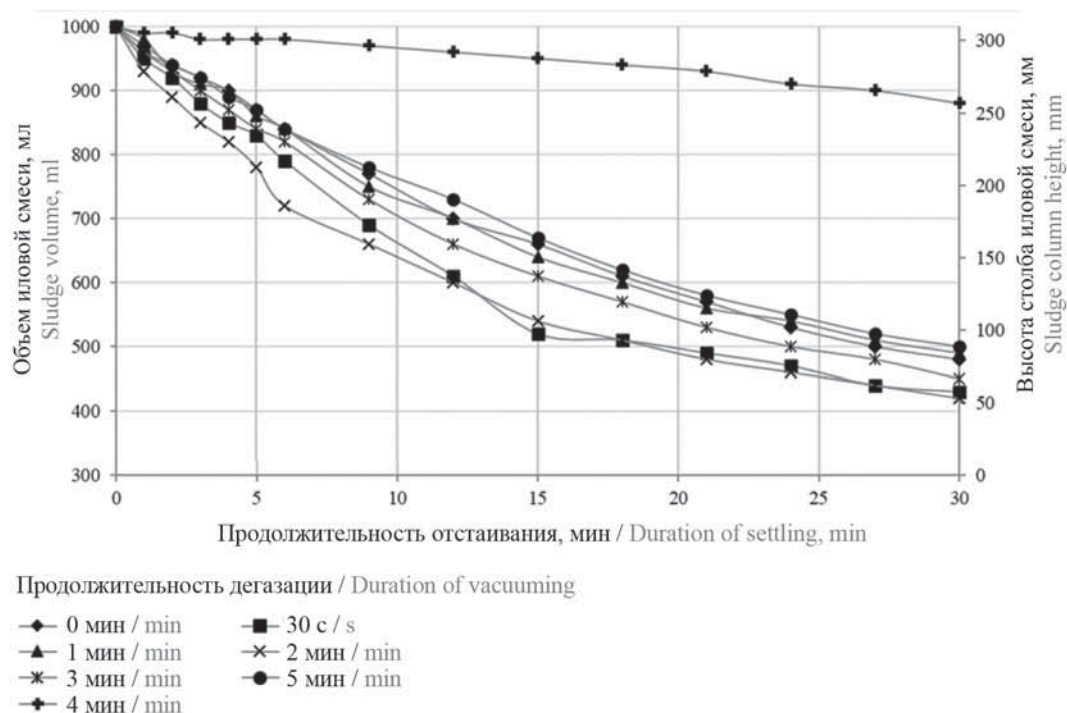


Рис. 8. Кривые кинетики снижения границы раздела «вода – ил» после вакуумирования иловой смеси

Fig. 8. Kinetic curves of the “water – sludge” boundary decrease after vacuuming of mixed liquor

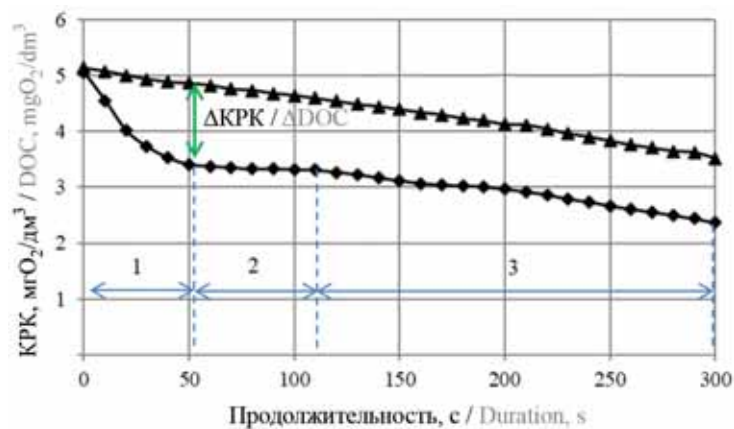


Рис. 9. Динамика изменения концентрации растворенного кислорода: —◆— КРК при воздействии вакуума; —▲— КРК при дыхании ила

Fig. 9. Dissolved oxygen concentration (DOC) dynamics: —◆— DOC when exposed to vacuum; —▲— DOC during sludge breathing

Рассмотрим пример решения. Для сооружений с производительностью 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут (4200 м<sup>3</sup>/ч в среднем) и степенью рециркуляции 100 % расход иловой смеси составит в сутки 200 тыс. м<sup>3</sup>/сут. При коэффициенте часовой неравномерности 1,47 максимальный часовой расход иловой смеси будет 10,5 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

Примем 6 колонн дегазации на двухминутное пребывание. Максимальный расход на одну колонну составит 1750 м<sup>3</sup>/час = 486 л/с. Объем одного резер-

вуара — 58 м<sup>3</sup>. Примерные размеры резервуара: диаметр — 2788 мм, длина — 10 500 мм. Давление (вакуум) в резервуаре поддерживается 90–95 кПа.

Если принять вакуумирование 0,5 мин, требуемый объем резервуара уменьшится в четыре раза: общий объем камер дегазации — 87,5 м<sup>3</sup>, примем 6 колонн по 14,6 м<sup>3</sup>.

Из исследованных в данной работе, продолжительность вакуумирования 0,5 мин является оптимальной по технико-экономическим показателям

и может быть рекомендована для практического применения.



Рис. 10. Колонна дегазации

Fig. 10. Degassing column

Использование полученных экспериментальных результатов, проведение аналогичных испытаний на рассматриваемых сооружениях и проведение технико-экономического обоснования позволят оценить рентабельность внедрения системы вакуумирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Задача эффективного илоразделения — актуальная при проектировании и эксплуатации биологических очистных сооружений. Знание седиментационных характеристик ила городских сооружений и их интенсификация позволят повысить надежность и эффективность очистки сточных вод. Существует большое количество технологических решений по совершенствованию работы вторичных отстойников. В работе рассмотрено вакуумирование (дегазация) иловой смеси как технология, увеличивающая производительность узла илоразделения и окислительной мощности биологической очистки, не требующая дополнительного строительства.

В рамках проведенных исследований оценены седиментационные характеристики активного ила городских канализационных очистных сооружений. Экспериментально подтверждена эффективность дегазации ила как метода интенсификации процессов илоразделения.

Выявлены закономерности осаждения при дозе от 0,6 до 5,6 г/л, графически описан процесс седиментации и установлено, что значительный рост скорости осаждения увеличивается при дозе менее 4 г/л.

Дегазация иловой смеси дает возможность усилить процесс илоразделения во вторичных отстойниках, в особенности это эффективно на сооружениях с глубоким удалением азота. Удаление газов из ила позволяет предотвратить его флотацию на поверхность жидкости в отстойнике и вынос биомассы с очищенной водой.

Данный процесс достаточно прост в монтаже и эксплуатации, может реализовываться как при новом строительстве, так и при модернизации действующих сооружений. Улучшение седиментационных характеристик ила способствует увеличению его дозы до 10 г/л, что существенно повышает окислительную мощность биологических сооружений.

В качестве оптимальной продолжительности дегазации можно принимать 0,5 мин, что соответствует наибольшим скоростям осаждения при низких дополнительных энергозатратах на обработку ила.

Полученные в рамках экспериментальных исследований сведения могут быть использованы при проектировании сооружений илоразделения как при новом строительстве, так и при реконструкции. Для оптимизации технологических параметров сооружений с вакуумированием иловой смеси рекомендуется адаптировать полученные данные с учетом индивидуальных особенностей илов различных очистных сооружений, что достигается проведением лабораторных испытаний по вакуумированию и седиментации ила.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков А.А. Управление работой малых канализационных очистных сооружений в условия нестабильной нагрузки // Наилучшие доступные технологии. 2020. № 4. С. 46–56.
2. Степанов С.В., Габидуллина Л.А., Степанов А.С., Дубов О.В. Биологическая очистка сточных вод нефтеперерабатывающего завода в биосорбционно-мембранном реакторе // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 12. С. 24–31.
3. Есин М.А., Ромашко А.В. Отечественный опыт реализации мембранных биореакторов по технологии «МУ МБР» для очистки производственных сточных вод // Наилучшие доступные технологии. 2017. № 6. С. 22–35.
4. Головин Л.В. Тонкослойные модули себя оправдывают // Вода Magazine. 2008. № 1. С. 14–19.
5. Данилович Д.А., Харькин С.В. Пути достижения технологических показателей НДТ в объемах существующих сооружений биологической очистки городских сточных вод // Наилучшие доступные технологии. 2017. № 1. С. 39–53.
6. Зайцева И.С., Зайцева Н.А., Воронина А.С. Методы интенсификации биологической очистки сточ-

ных вод в аэротенках // Вестник КузГТУ. 2010. № 2. С. 90–91.

7. Liu Y.-Q., Suhartini S., Guo L., Xiong Y. Improved biological wastewater treatment and sludge characteristics by applying magnetic field to aerobic granules // AIMS Bioengineering. 2016. Vol. 3. Issue 4. Pp. 412–424. DOI: 10.3934/bioeng.2016.4.412

8. Bakiri Z., Nacef S. Development of an improved model for settling velocity and evaluation of the settleability characteristics // Water Environment Research. 2020. Vol. 92. Issue 7. Pp. 1089–1098. DOI: 10.1002/wer.1306

9. Кевбрина М.В., Козлов М.Н., Дорофеев А.Г. Вторичные отстойники: сравнение методов расчета при проектировании и анализ параметров эффективной эксплуатации сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 3. С. 13–22.

10. Унгуряну Д.В. К вопросу управления комплексом биологической очистки «аэротенк — вторичный отстойник» // Вода и экология: проблемы и решения. 2004. № 3. С. 34–42.

11. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.

12. Van Losdrecht M., Nielsen P.J., Lopez-Vasquez C., Brdjanovich D. Experimental methods in wastewater treatment. IWA Publishing, 2016. 346 p.

13. Wang L., Zhan H., Wang Q., Wu G., Cui D. Enhanced aerobic granulation by inoculating dewatered activated sludge under short settling time in a sequencing batch reactor // Bioresource Technology. 2019. Vol. 286. P. 121386. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121386

14. Жмур Н.С. Анализ причин развития и методы подавления нитчатого вспухания активного ила и пенообразования // Часть 1 — Водоснабжение и канализация. 2011. № 1–2. С. 94–106.

15. Жмур Н.С. Анализ причин развития и методы подавления нитчатого вспухания активного ила и пенообразования // Часть 2 — Водоснабжение и канализация. 2011. № 3–4. С. 102–112.

16. Suresh A., Grygoliowicz-Pawlak E., Pathak S., Poh L.S., Abdul Majid M.B., Dominiak D. et al. Understanding and optimization of the flocculation process in biological wastewater treatment processes: A review // Chemosphere. 2018. Vol. 210. Pp. 401–416. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.021

17. Campos F., Guimarães N.R., Maia F.C., Sandoval M.Z., Bassin J.P., Bueno R.F. et al. Treatment of real domestic sewage in a pilot-scale aerobic granular sludge reactor: Assessing start-up and operational control // Water Environment Research. 2020. DOI: 10.1016/j.wroa.2019.100033

18. Губанова Д.Д., Желтова Д.И. Разработка способа реагентной обработки иловой смеси // Водоочистка. 2018. № 1–2. С. 59–63.

19. Кулаков А.А., Терехова Е.М., Куцевол М.А. Совершенствование методов обработки осадков го-

родских сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 5. С. 49–54.

20. Le-Clech P. Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments // Applied Microbiology and Biotechnology. 2010. Vol. 88 (6). Pp. 1253–1260. DOI: 10.1007/s00253-010-2885-8

21. Iorhemen O.T., Hamza R.A., Tay J.H. Membrane Bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling // Membranes (Basel). 2016. Vol. 6 (2). P. 33. DOI: 10.3390/membranes6020033

22. Maciejewski M., Oleszkiewicz J.A., Golcz A., Nazar A. Degasification of mixed liquor improves settling and biological nutrient removal // Water practice and technology. 2010. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.2166/wpt.2010.009

23. Maciejewski M., Oleszkiewicz J., Drapiewski J., Golcz A., Nazar A. Mixed liquor vacuum degassing (MLVD) — a highly effective and efficient method of activated sludge bulking and flush-out prevention in the wastewater treatment, with simultaneous improvement of total nitrogen removal // Proceedings of 7th European Waste Water Management Conference. Manchester. 2013.

24. Makisha N., Kulakov A. Peculiarities of clarifiers' reconstruction at waste water treatment plants // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 112. P. 10018. DOI: 10.1051/mateconf/201711210018

25. Daigger G.T., Redmond E., Downing L. Enhanced settling in activated sludge: design and operation considerations // Water Science and Technology. 2018. Vol. 78 (1–2). Pp. 247–258. DOI: 10.2166/wst.2018.287

26. Hagman M., Nyberg A., Grundestam J., Mases M., la Cour Jansen J. Laboratory-scale assessment of vacuum-degassed activated sludge for improved settling properties // Environmental Technology. 2017. Vol. 38 (17). Pp. 2193–2201. DOI: 10.1080/09593330.2016.1251498

27. Gnida A., Skonieczna M. Vacuum treatment changes characteristics of activated sludge // International Journal of Environmental Science and Technology. 2020. Vol. 17. Pp. 2073–2084. DOI: 10.1007/s13762-019-02602-1

28. Gnida A., Skonieczna M. Diversity among activated sludge in vacuum degassed laboratory systems // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 281. P. 111870. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111870

29. Liu W., Wu Y., Zhang S., Gao Y., Jiang Y., Horn H. et al. Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic (A<sup>2</sup>O) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage // Water Research. 2020. Vol. 178. P. 115825. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115825

30. Кулаков А.А., Шафигулина А.Ф. Подход к совершенствованию малых коммунальных канализационных очистных сооружений // Водоочистка. 2016. № 8. С. 28–36.

31. Кулаков А.А., Макиша Н.А., Шафигуллина А.Ф., Хардер Р. Исследование седиментационных свойств иловой смеси городских канализацион-

ных очистных сооружений // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 643–650. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.643-650

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 1 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 1 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Артем Алексеевич Кулаков** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологической и промышленной безопасности; **МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)**; 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78; SPIN-код: 4831-8227, Scopus: 56646070200, ResearcherID: O-1183-2016, ORCID: 0000-0002-2079-6435; artem.a.kulakov@gmail.com;

**Алина Фаритовна Филатова** — магистр; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; ведущий консультант департамента стратегического планирования; **Правительство Вологодской области**; 160000, г. Вологда, ул. Козленская, д. 8; SPIN-код: 4984-2493; alinaisf@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Kulakov A.A. Management of small wastewater treatment plants under unstable load conditions. *Best Available Water Supply and Sanitation Technologies*. 2020; 4:46-56. (rus.).
2. Stepanov S.V., Stepanov A.S., Gabidullina L.A., Dubov O.V. Biological treatment of oil refinery wastewater in a biosorption membrane reactor. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2015; 12:24-31. (rus.).
3. Esin M.A., Romashko A.V. National experience in the implementation of membrane bioreactors according to “MY MBR” technology for industrial wastewater treatment. *Best Available Water Supply and Sanitation Technologies*. 2017; 6:22-35. (rus.).
4. Golovin L.V. Thin-ply modules pay off. *Water Magazine*. 2008; 1:14-19. (rus.).
5. Danilovich D.A., Kharkin S.V. Ways to achieve BAT technological indicators in the volume of existing biological treatment facilities of municipal wastewater. *Best Available Water Supply and Sanitation Technologies*. 2017; 1:39-53. (rus.).
6. Zaitseva I.S., Zaitseva N.A., Voronina A.S. Intensification methods of biological wastewater treatment in aeration tanks. *Vestnik KuzSTU*. 2010; 2:90-91. (rus.).
7. Liu Y.-Q., Suhartini S., Guo L., Xiong Y. Improved biological wastewater treatment and sludge characteristics by applying magnetic field to aerobic granules. *AIMS Bioengineering*. 2016; 3(4):412-424. DOI:10.3934/bioeng.2016.4.412
8. Bakiri Z., Nacef S. Development of an improved model for settling velocity and evaluation of the settleability characteristics. *Water Environment Research*. 2020; 92(7):1089-1098. DOI: 10.1002/wer.1306
9. Kevbrina M.V., Kozlov M.N., Dorofeev A.G. Secondary settlers: comparison of the calculation methods in designing and analysis of the parameters of efficient operation of the facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 3:13-22. (rus.).
10. Ungureanu D.V. On the management of the biological treatment complex “aerotank — secondary settling tank”. *Water and Ecology*. 2004; 3:34-42. (rus.).
11. Zhmur N.S. *Technological and biochemical processes of wastewater treatment at plants with aeration tanks*. Moscow, AQUAROS, 2003; 512. (rus.).
12. Van Losdrecht M., Nielsen P.J., Lopez-Vasquez C., Brdjanovich D. *Experimental methods in wastewater treatment*. IWA Publishing, 2016; 346.
13. Wang L., Zhan H., Wang Q., Wu G., Cui D. Enhanced aerobic granulation by inoculating dewatered activated sludge under short settling time in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*. 2019; 286:121386. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121386
14. Zhmur N.S. Analysis of the causes and methods of suppression of filamentous bloating of activated sludge and foaming. *Part 1 — Water supply and sewerage*. 2011; 1-2:94-106. (rus.).
15. Zhmur N.S. Analysis of the causes and methods of suppression of filamentous bloating of activated sludge and foaming. *Part 2 — Water supply and sewerage*. 2011; 3-4:102-112. (rus.).
16. Suresh A., Grygolowicz-Pawlak E., Pathak S., Poh L.S., Abdul Majid M.B., Dominiak D. et al. Understanding and optimization of the flocculation process in biological wastewater treatment processes: A review. *Chemosphere*. 2018; 210:401-416. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.021
17. Campos F., Guimarães N.R., Maia F.C., Sandoval M.Z., Bassin J.P., Bueno R.F. et al. Treatment of real domestic sewage in a pilot-scale aerobic granular sludge reactor: Assessing start-up and operational control. *Water Environment Research*. 2020. DOI: 10.1016/j.wroa.2019.100033
18. Gubanova D.D., Zheltova D.I. Development of reagent treatment of sludge mixture method. *Water Treatment*. 2018; 1-2:59-63. (rus.).

19. Kulakov A.A., Terekhova E.M., Kutsevol M.A. Improvement of municipal wastewater sludge treatment methods. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 5:49-54. (rus.).
20. Le-Clech P. Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010; 88(6):1253-1260. DOI: 10.1007/s00253-010-2885-8
21. Iorhemen O.T., Hamza R.A., Tay J.H. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes (Basel)*. 2016; 6(2):33. DOI: 10.3390/membranes6020033
22. Maciejewski M., Oleszkiewicz J.A., Golcz A., Nazar A. Degasification of mixed liquor improves settling and biological nutrient removal. *Water Practice and Technology*. 2010; 5(1). DOI: 10.2166/wpt.2010.009
23. Maciejewski M., Oleszkiewicz J., Drapiewski J., Golcz A., Nazar A. Mixed liquor vacuum degassing (MLVD) — a highly effective and efficient method of activated sludge bulking and flush-out prevention in the wastewater treatment, with simultaneous improvement of total nitrogen removal. *Proceedings of 7th European Waste Water Management Conference*. Manchester, 2013.
24. Makisha N., Kulakov A. Peculiarities of clarifiers' reconstruction at waste water treatment plants. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 112:10018. DOI: 10.1051/mateconf/201711210018
25. Daigger G.T., Redmond E., Downing L. Enhanced settling in activated sludge: design and operation considerations. *Water Science and Technology*. 2018; 78(1-2):247-258. DOI: 10.2166/wst.2018.287
26. Hagman M., Nyberg A., Grundestam J., Mases M., la Cour Jansen J. Laboratory-scale assessment of vacuum-degassed activated sludge for improved settling properties. *Environmental Technology*. 2017; 38(17):2193-2201. DOI: 10.1080/09593330.2016.1251498
27. Gnida A., Skonieczna M. Vacuum treatment changes characteristics of activated sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020; 17:2073-2084. DOI: 10.1007/s13762-019-02602-1
28. Gnida A., Skonieczna M. Diversity among activated sludge in vacuum degassed laboratory systems. *Journal of Environmental Management*. 2021; 281:111870. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111870
29. Liu W., Wu Y., Zhang S., Gao Y., Jiang Y., Horn H. et al. Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic (A<sup>2</sup>O) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage. *Water Research*. 2020; 178:115825. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115825
30. Kulakov A.A., Shafigullina A.F. An approach to improving small municipal wastewater treatment plants. *Water Treatment*. 2016; 8:28-36. (rus.).
31. Kulakov A.A., Makisha N.A., Shafigullina A.F., Harder R. Investigation of sedimentation properties of sludge liquor at wastewater treatment plants. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(5):(116):643-650. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.643-650 (rus.).

Received December 25, 2020.

Adopted in revised form on April 1, 2021.

Approved for publication on April 1, 2021.

**BIONOTES:** **Artem A. Kulakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecological and Industrial Safety; **MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA)**; 76 prospect Vernadskogo, Moscow, 119454, Russian Federation; SPIN-code: 4831-8227, Scopus: 56646070200, ResearcherID: O-1183-2016, ORCID: 0000-0002-2079-6435; artem.a.kulakov@gmail.com;

**Alina F. Filatova** — master's degree; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; Lead Consultant of the Department of Strategic Planning; **Government of the Vologda Region**; 8 Kozlenskaya st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 4984-2493; alinaisf@yandex.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 указываются 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 должно соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

**Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

# КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

## ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение** (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

**Материалы и методы** (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

**Результаты** (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это — основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

**Заключение** (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

## КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

### Образец:

#### Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

#### Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

### Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

### Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

### Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](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.

**В footnotes:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**ВНИМАНИЕ!** Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

|                                              | Форма № ПД-4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                          |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <p><b>Извещение</b></p> <p><b>Кассир</b></p> | <p><b>УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001</b></p> <p style="text-align: center;">(наименование получателя платежа)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> <p>в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u></p> <p style="text-align: center;">(наименование банка получателя платежа)</p> <p>КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u></p> <p>ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u></p> <p>Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.<br/>подписка на январь, февраль, март, апрель,<br/>май, июнь 2021 г.</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%; text-align: center;">(наименование платежа)</td> <td style="width: 40%; text-align: center;">Вестник МГСУ<br/>(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> <p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p> <p style="text-align: right;">Сумма<br/>платы<br/>за</p> <p>Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p> <p style="text-align: right;">Подпись<br/>плательщика _____</p> | 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0                  | (ИНН получателя платежа)                | (номер счета получателя платежа) | (наименование платежа)           | Вестник МГСУ<br>(номер лицевого счета (код) плательщика) |                                                          |
|                                              | 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                          |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|                                              | (ИНН получателя платежа)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | (номер счета получателя платежа)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                          |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|                                              | (наименование платежа)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Вестник МГСУ<br>(номер лицевого счета (код) плательщика)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                          |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|                                              | <p><b>Квитанция</b></p> <p><b>Кассир</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p style="text-align: right;">Форма № ПД-4</p> <p><b>УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001</b></p> <p style="text-align: center;">(наименование получателя платежа)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> <p>в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u></p> <p style="text-align: center;">(наименование банка получателя платежа)</p> <p>КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u></p> <p>ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u></p> <p>Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.<br/>подписка на январь, февраль, март, апрель,<br/>май, июнь 2021 г.</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%; text-align: center;">(наименование платежа)</td> <td style="width: 40%; text-align: center;">Вестник МГСУ<br/>(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> <p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p> <p style="text-align: right;">Сумма<br/>платы<br/>за</p> <p>Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p> <p style="text-align: right;">Подпись<br/>плательщика _____</p> | 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1                                      | 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 | (ИНН получателя платежа)         | (номер счета получателя платежа) | (наименование платежа)                                   | Вестник МГСУ<br>(номер лицевого счета (код) плательщика) |
|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0                  |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | (ИНН получателя платежа)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | (номер счета получателя платежа)                         |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |
|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | (наименование платежа)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Вестник МГСУ<br>(номер лицевого счета (код) плательщика) |                                         |                                  |                                  |                                                          |                                                          |

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

**ВНИМАНИЕ!**

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](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. 14-23), [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/>





