

## IN THE ISSUE:

## В НОМЕРЕ:

- Influence of the technological conditions of detonation coatings application on their phase composition
- Preparation of a complex organic-mineral additive based on phloroglucinol-furfural oligomers and silicon dioxide nanoparticles
- Synergetic improvement of technological characteristics of highway road surfaces by bitumen microdispersed emulsions
- Effect of adhesion additive and nature of filler on interfacial interaction and fatigue parameters of asphalt mastic
- Влияние технологических условий получения детонационных покрытий на их фазовый состав
- Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинолфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния
- Синергетическое улучшение битумными микродисперсными эмульсиями технологических характеристик дорожных покрытий транспортных автомагистралей
- Влияние адгезионной добавки и природы наполнителя на межфазное взаимодействие и усталостные параметры асфальтовых вяжущих

[www.nanobuild.ru](http://www.nanobuild.ru)

e-mail: [info@nanobuild.ru](mailto:info@nanobuild.ru)

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY  
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY  
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE  
OF INTELLECTUAL  
PROPERTY (CHINA)



## NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

ISSN 2075-8545 (online)

## NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

## НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

«Nanotechnologies in Construction» is a peer-reviewed journal.

**The main aim of the Journal is to provide information support for the process of invention and practical application of science intensive technologies** (mostly nanotechnological products) in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).

### The main tasks:

- Providing scientists and specialists from different countries with the opportunity to publish the results of their research and receive information about modern technologies and materials, high-performance equipment in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).
- To provide information support and participate in the events (forums, conferences, symposia, workshops, exhibitions, round tables etc) devoted to nanoindustry and problems of application of nanoindustry in construction and housing and communal services, which are perspective and of great importance.

**The Journal has been published since 2009. Frequency: bimonthly.**

**These are the topics of the papers published in the journal:** creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; technologies aimed at studying nanomaterial properties; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

**The journal can also publish:** original papers; reviews; discussing materials, comments, other information materials.

**The language of publication:** English; Russian.

### The edition's readers and authors are:

- students, lecturers, post-graduates and people working for doctor's degree;
- scientists and specialists of research institutes and nanotechnological centers;
- heads and specialists of the institutions, organizations and factories from the sphere of construction and housing and communal services;
- scientists and specialists of the industries which are adjacent to construction;
- experts of the enterprise-producers manufacturing nanoindustrial output.

## EDITORS

**CHIEF EDITOR – Boris V. GUSEV**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department «Construction Materials and Technologies» Russian University of transport, President of the Russian Academy of Engineering and the International Academy of Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Laureate of the USSR and the Russian Federation State Prizes, Laureate of 5 Governmental Prizes of the Russian Federation in the field of science and education, Honored Scientist of Russian Federation, Moscow, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

**EXECUTIVE EDITORIAL SECRETARY – Vladimir I. VEDENYAPIN**, Moscow, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

**DEPUTY CHIEF EDITOR – Leonid A. IVANOV**, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

**EXECUTIVE EDITOR – Yulia A. EVSTIGNEEVA**, Member of Russian Association of Journalists, Moscow, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

**HEAD OF DESIGN DEPARTMENT – Andrey S. REZNICHENKO**, Businessman, Moscow, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

**CHIEF FOR FOREIGN RELATIONS – Zhanna V. PISARENKO**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru



## EDITORIAL BOARD

**Peter J.M. BARTOS**, Prof., Queen's University of Belfast, RILEM Technical Committee TC 197-NCM on Nanotechnology in Construction Materials (2002–2009), Scottish Centre for Nanotechnology in Construction Materials (University of West Scotland), Belfast, UK

**Vyacheslav R. FALIKMAN**, Dr. (Mater.), Scientific Research Center «Construction», Structural Concrete Association, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Moscow, Russian Federation

**Wenlong BAI**, Ph.D., Beijing Institute of Intellectual Property, Beijing, China

**Oleg L. FIGOVSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Israel Polymate research center, Nanotech Industries, Inc., Daly City, California, USA; Migdal HaEmek, Israel

**Zhengyi FU**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Wuhan University of Technology, State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan, China

**Leonid A. IVANOV**, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation

**Sergei V. KALIUZHNIY**, Dr. Sci. (Chem.), Prof., RUSNANO, Moscow, Russian Federation

**Vadim G. KHOZIN**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Department «Technology of Construction Materials, Products and Structures», Kazan, Russian Federation

**Evgeniy V. KOROLEV**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Vice Rector for Research, Saint Petersburg, Russian Federation

**Leonid M. LYNKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Department «Information Security», Minsk, Belarus

**Polad MALKIN**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Ben-Gurion University in the Negev, StartUpLab, Beer-Sheva, Israel

**Viktor S. MECHTCHERINE**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Technical University of Dresden, Institute of Construction Materials, Dresden, Germany

**Surendra P. SHAH**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

**Vladimir Y. SHEVCHENKO**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Grebenshchikov of Russian Academy of Sciences, Coordinating Council on Development of Nanotechnologies attached to the Committee of the Council of the Federation of the Federal Assembly of the RF on Science, Culture, Education, Medicine and Ecology, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Pawel SIKORA**, Ph.D., Associate Professor, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Department of General Civil Engineering, Szczecin, Poland

**Konstantin G. SOBOLEV**, Prof., University of Wisconsin-Milwaukee, Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Milwaukee, Wisconsin, USA

**Valeriy I. TELICHENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Larisa A. URKHANOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., East-Siberian State University of Technologies and Management, Department «Production of Building Materials and Wares», Ulan-Ude, Russian Federation

**Rongming WANG**, Ph.D., Prof., Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, School of Mathematics and Physics University of Science and Technology Beijing, Beijing Key Laboratory for Magneto-Photoelectrical Composite and Interface Science, Beijing, China

**Li D. XU**, Ph.D., Prof., Old Dominion University, of Information Technologies & Decision Sciences Department; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Norfolk, Virginia, USA

**The Journal is registered as an independent mass media in the Ministry of Communication and Mass Media of the Russian Federation.** (Registration Certificate ЭЛ № ФС77 – 35813 of 31 March 2009 issued by the Federal Service on Supervision in the Sphere of Connection and Mass Communications).

**Founder and Publisher** – Center for New Technologies «Nanostroitel'stvo», Korolev, Moscow region, Russian Federation

**Contacts:** e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

**Address of edition:** Russian Federation, 125009, Moscow, Gazetny per., bld. 9, str. 4

**Contacts:** e-mail: info@nanobuild.ru

**Website:** <http://nanobuild.ru/>

**Release date of № 5 (Vol. 16) is 21.10.2024**

## ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY  
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY  
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE  
OF INTELLECTUAL PROPERTY  
(CHINA)



## CONTENTS

<b>PUBLISHER INFORMATION</b> .....	393
<b>TO THE AUTHORS AND READERS</b>	
The journal "Nanotechnology in Construction" has been ranked second in the RSCI SCIENCE INDEX for the topic of "Construction and Architecture" in 2023! .....	396
<b>CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE</b>	
<i>Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Lykyanova N.A.</i> Effective gypsum compositions with the addition of underburned ash and slag mixtures .....	397
<b>THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS</b>	
<i>Sirota V.V. Savotchenko S.E. Strokova V.V. Bondarenko D.O. Podgorny D.S.</i> Influence of the technological conditions of detonation coatings application on their phase composition .....	404
<b>THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES</b>	
<i>Gorbatova V.N., Gordeeva I.V., Dudareva T.V., Krasotkina I.A.</i> Effect of adhesion additive and nature of filler on interfacial interaction and fatigue parameters of asphalt mastic .....	415
<i>Lu Y., Pisarenko Zh.V., Yang L., Ivanov L.A., Ye C.</i> Advancing decision-making: the role of management analytics in modern business practices .....	431
<b>INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION</b>	
Wuhan University of Technology .....	441
<b>APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION</b>	
<i>Starchenko S.A., Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Kozhanova E.P.</i> Preparation of a complex organic-mineral additive based on phloroglucinol-furfural oligomers and silicon dioxide nanoparticles .....	447
<i>Glazachev A.O., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Salov A.S., Akhmetshin R.M.</i> Synergetic improvement of technological characteristics of highway road surfaces by bitumen microdispersed emulsions .....	463
<b>SYSTEM SOLUTIONS FOR TECHNOLOGICAL PROBLEMS</b>	
<i>Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Chibisov A.V., Chilikin V.M.</i> Comprehensive assessment of the geological heterogeneity of reservoir systems in the process of regulating the development of oil fields .....	473
<b>PUBLISHING ETHICS</b> .....	485
<b>AUTHOR GUIDELINES</b> .....	489



НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ  
NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION  
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

ISSN 2075-8545 (online)

«Нанотехнологии в строительстве» – рецензируемый научный журнал.

**Основной целью журнала является информационное обеспечение процесса создания и внедрения в мире наукоемких технологий** (прежде всего – нанотехнологической продукции) в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).

**Основные задачи:**

- Предоставление ученым и специалистам из разных стран возможности публиковать результаты своих исследований и получать информацию о современных технологиях и материалах, высокоэффективном оборудовании в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).
- Информационная поддержка и участие в мероприятиях (форумах, конференциях, симпозиумах, семинарах, выставках, круглых столах и т.д.) по nanoиндустрии и прикладным вопросам нанотехнологий в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства, имеющих актуальное и перспективное практическое значение.

**Журнал издается с 2009 года. Периодичность – 6 номеров в год.**

**В журнале публикуются работы по следующим темам:** создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

**Журнал принимает к публикации:** оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, другие информационные материалы.

**Язык издания:** русский; английский.

**Авторами и читателями издания являются:**

- студенты, преподаватели, аспиранты и докторанты вузов;
- ученые и специалисты научно-исследовательских институтов и нанотехнологических центров;
- руководители и специалисты учреждений, организаций и предприятий строительного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства;
- ученые и специалисты смежных со строительством отраслей;
- эксперты фирм-производителей продукции nanoиндустрии.

**РЕДАКЦИЯ**

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – ГУСЕВ Борис Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии» Российского университета транспорта, президент Российской инженерной академии и Международной инженерной академии, член-корреспондент РАН, лауреат Государственных премий СССР и РФ, 5-ти премий Правительства РФ в области науки и образования, заслуженный деятель науки РФ, г. Москва, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

**ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ – ВЕДЕНЯПИН Владимир Иванович**, г. Москва, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – ИВАНОВ Леонид Алексеевич**, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

**ШЕФ-РЕДАКТОР – ЕВСТИГНЕЕВА Юлия Анатольевна**, член Союза журналистов России, г. Москва, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

**НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ДИЗАЙНА И ВЕРСТКИ – РЕЗНИЧЕНКО Андрей Сергеевич**, индивидуальный предприниматель, г. Москва, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

**РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ПО ВНЕШНИМ СВЯЗЯМ – ПИСАРЕНКО Жанна Викторовна**, д-р экон. наук, профессор кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Питер Дж. М. БАРТОШ**, профессор, Королевский Университет Белфаста, Технический комитет по нанотехнологиям в строительных материалах РИЛЕМ (2002–2009 гг.), Шотландский центр по нанотехнологиям в строительных материалах (Университет Западной Шотландии), г. Белфаст, Великобритания

**ФАЛИКМАН Вячеслав Рувимович**, д-р материаловедения, Научно-исследовательский центр «Строительство», ассоциация «Железобетон», Международный союз экспертов и лабораторий по испытанию строительных материалов, систем и конструкций (РИЛЕМ), технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Москва, Российская Федерация

**БАЙ Вэньлун**, д-р философии, Пекинский институт интеллектуальной собственности, г. Пекин, Китай

**ФИГОВСКИЙ Олег Львович**, д-р техн. наук, Израильский исследовательский центр Polymate, Nanotech Industries, Inc., г. Дейли-Сити, Калифорния, США; г. Мигдаль-ха-Эмек, Израиль

**Фу ДЖЕНЬИ**, д-р техн. наук, профессор, Уханьский технологический университет, Государственная главная лаборатория передовых технологий для синтеза и обработки материалов, г. Ухань, Китай

**ИВАНОВ Леонид Алексеевич**, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация

**КАЛЮЖНЫЙ Сергей Владимирович**, д-р хим. наук, профессор, ОАО «РОСНАНО», г. Москва, Российская Федерация

**ХОЗИН Вадим Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций», г. Казань, Российская Федерация

**КОРОЛЁВ Евгений Валерьевич**, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, проректор по научной работе, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**ЛЫНЬКОВ Леонид Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра «Защита информации», г. Минск, Беларусь

**МАЛКИН Полад**, д-р ф.-м. наук, Университет Бен-Гуриона в Негеве, StartUpLab, г. Беэр-Шева, Израиль

**МЕЩЕРИН Виктор Сергеевич**, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Дрездена, Институт строительных материалов, г. Дрезден, Германия

**СУРЕНДРА П. Шах**, д-р техн. наук, профессор, Северо-Западный Университет, г. Эванстон, Иллинойс, США

**ШЕВЧЕНКО Владимир Ярославович**, д-р хим. наук, профессор, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Координационный совет по развитию нанотехнологий при Комитете Совета Федерации ФС РФ по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**СИКОРА Павел**, доктор наук, Западно-Поморский технологический университет, факультет гражданского и экологического строительства, факультет общего гражданского строительства, г. Щецин, Польша

**СОБОЛЕВ Константин Геннадиевич**, профессор, Университет Висконсин-Милуоки, технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Милуоки, Висконсин, США

**ТЕЛИЧЕНКО Валерий Иванович**, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

**УРХАНОВА Лариса Алексеевна**, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, кафедра «Производство строительных материалов и изделий», г. Улан-Удэ, Российская Федерация

**ВАН Жунмин**, д-р философии, профессор, Пекинский Центр передовых инноваций в области геномной инженерии материалов, Школа математики и физики Пекинского университета науки и технологий, Пекинская ключевая лаборатория магнито-фотоэлектрических композитов и интерфейсов, г. Пекин, Китай

**СЮЙ ЛИ ДА**, д-р философии, профессор, Университет Олд Доминион, Отдел информационных технологий; Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), г. Норфолк, Вирджиния, США

Журнал зарегистрирован как самостоятельное средство массовой информации в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77 – 35813 от 31 марта 2009 г.).

**Учредитель и издатель** – ООО «Центр Новых Технологий «Наностроительство», г. Королев, Московская область, Российская Федерация  
**Контакты:** e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

**Адрес редакции:** Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., дом 9, стр. 4

**Контакты:** e-mail: info@nanobuild.ru; **Сайт:** http://nanobuild.ru/

Дата выхода в свет № 5, Том 16, 2024: 21.10.2024 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



РОССИЙСКОЙ  
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)



ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ</b> .....	393
<b>К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ</b>	
Журнал «Нанотехнологии в строительстве» – на 2 месте в рейтинге SCIENCE INDEX РИНЦ по тематике «Строительство. Архитектура» за 2023 год! .....	396
<b>СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>	
Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А. Эффективные гипсовые композиции с добавкой недожого золошлаковых смесей .....	397
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ</b>	
Сирота В.В., Савотченко С.Е., Строкова В.В., Бондаренко Д.О., Подгорный Д.С. Влияние технологических условий получения детонационных покрытий на их фазовый состав .....	404
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ</b>	
Горбатова В.Н., Гордеева И.В., Дударева Т.В., Красоткина И.А. Влияние адгезионной добавки и природы наполнителя на межфазное взаимодействие и усталостные параметры асфальтовых вяжущих .....	415
Лу Я., Писаренко Ж.В., Ян Л., Иванов Л.А., Йе Ч. Совершенствование процесса принятия решений: роль управленческой аналитики в современной бизнес-практике .....	431
<b>МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО</b>	
Уханьский технологический университет .....	441
<b>ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ</b>	
Старченко С.А., Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния .....	447
Глазачев А.О., Иванова О.В., Павлов С.Ю., Салов А.С., Ахметшин Р.М. Синергетическое улучшение битумными микродисперсными эмульсиями технологических характеристик дорожных покрытий транспортных автомагистралей .....	463
<b>СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ</b>	
Котенёв Ю.А., Султанов Ш.Х., Чибисов А.В., Чиликин В.М. Комплексная оценка геологической неоднородности пластовых систем при решении задачи регулирования процесса выработки запасов нефти .....	473
<b>ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА</b> .....	485
<b>ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ</b> .....	489



## The journal "Nanotechnology in Construction" has been ranked second in the RSCI SCIENCE INDEX for the topic of "Construction and Architecture" in 2023!

### Dear authors and readers of the journal "Nanotechnologies in Construction"!

We inform our readers that the ranking of journals for the year 2023, as published on the website of the Scientific Electronic Library eLibrary.RU, has been released. The indicators for the journal "Nanotechnology in Construction" in the SCIENCE INDEX ranking for the year 2023 (as of 09.17.2024) are as follows:

- 2<sup>nd</sup> position out of 94 journals in the SCIENCE INDEX ranking for the category "Construction. Architecture";
- 248<sup>th</sup> position out of 3,981 journals in the overall SCIENCE INDEX ranking;
- percentile in the SCIENCE INDEX ranking is 7%.

The link: [https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=28655](https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=28655)

Our congratulations to the authors and readers on this achievement!

"This result was achieved thanks to the active contribution and support from the editorial board members and the effective partnership with the experts of the Association of Science Editors and Publishers (ASEP). The high-quality materials provided by the authors, their adherence to the editorial board's requirements, the comprehensive review process by our reviewers, and the highly professional and responsible approach of the editorial staff have all played significant roles in this achievement."

The motto of the journal since its foundation is "GIGA success is being built from NANO", and it has become more and more a reality over the past 16 years.

Many thanks to everyone who is engaged in the production of the journal, as well as to the leading Russian and foreign scientists and specialists who use the materials of the journal in their research works!

We invite leading scientists and specialists to publish materials about their research.

We hope for further fruitful cooperation.

If you have any questions, please contact us via e-mail: [info@nanobuild.ru](mailto:info@nanobuild.ru)

*Publishing House of the journal "Nanotechnologies in Construction"*





## Журнал «Нанотехнологии в строительстве» – на 2 месте в рейтинге SCIENCE INDEX РИНЦ по тематике «Строительство. Архитектура» за 2023 год

### Уважаемые авторы и читатели журнала «Нанотехнологии в строительстве»!

Сообщаем Вам, что на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU опубликованы показатели рейтинга SCIENCE INDEX журналов за 2023 год. Показатели журнала «Нанотехнологии в строительстве» в рейтинге SCIENCE INDEX за 2023 год (по состоянию на 17.09.2024 г.):

- **2-е место** из 94 изданий в рейтинге SCIENCE INDEX по тематике «Строительство. Архитектура»;
- 248-е место из 3981 изданий в общем рейтинге SCIENCE INDEX;
- процентиль в рейтинге SCIENCE INDEX – 7%.

Ссылка – [https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=28655](https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=28655)

Поздравляем авторов и читателей журнала с этим событием!

Такого результата удалось добиться благодаря активной работе и помощи членов редакционной коллегии, эффективному сотрудничеству с экспертами Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), высококачественным материалам авторов и выполнению ими требований редакции, всесторонней оценке статей рецензентами, высокопрофессиональному и ответственному отношению к делу сотрудников редакции.

Девиз журнала с момента его создания – «из НАНО строится ГИГАуспех», и это за прошедшие 16 лет все больше становится реальностью.

Большое спасибо всем, кто участвует в выпуске журнала, а также ведущим российским и зарубежным ученым и специалистам, которые используют материалы журнала в своих публикациях!

Приглашаем ведущих ученых и специалистов к публикации материалов о своих исследованиях. Надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

По всем вопросам просим обращаться по e-mail: [info@nanobuild.ru](mailto:info@nanobuild.ru)

*Издательство журнала «Нанотехнологии в строительстве»*





## Effective gypsum compositions with the addition of underburned ash and slag mixtures

Victoria B. Petropavlovskaya<sup>1</sup> , Tatiana B. Novichenkova<sup>1\*</sup> , Aleksandr F. Buryanov<sup>2</sup> ,  
Nadezda A. Lykhanova<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, Russia

<sup>2</sup> The National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

\* Corresponding author: e-mail: tanovi.69@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, research and development in the field of nanomaterials science is being conducted worldwide. The rationale for developing innovative energy-saving materials based on gypsum binders for buildings and structures with optimized carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions allows us to consider underburnt ash and slag mixtures as a promising technogenic product that allows us to comprehensively solve technological, economic and environmental problems in the construction industry. The study of the possibility of synthesizing promising mineral compositions based on underburnt products isolated from non-recyclable ash and slag mixtures (ASM) of coal-fired power plants ensures the development of a base of design and engineering solutions for buildings and facilities with rational energy consumption and optimized CO<sub>2</sub> emissions using gypsum nanomaterials with unique properties. **Materials and methods.** In the study, technogenic carbon (underburning) was isolated from ash and slag mixtures by flotation enrichment using reagents (flotators). **Results and discussions.** The results of the study of energy-efficient gypsum composites based on a technogenic carbon modifier confirm its active participation in the processes of structure formation and crystallization of nanostructured building materials with high-tech characteristics. **Conclusion.** The research results obtained in the field of developing innovative, energy-efficient, cement-free building materials can contribute to an increase in the level of knowledge and the development of innovative approaches in construction materials science. These findings will be useful for subsequent implementation in the construction industry. The research topic is in line with the implementation of state programs, including the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation.

**KEYWORDS:** carbon footprint, cementless compositions, ash and slag waste, underburning, nanoreinforcement.

### FOR CITATION:

Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Lykhanova N.A. Effective gypsum compositions with the addition of underburned ash and slag mixtures. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16 (5): 397–403. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-397-403>. – EDN: MYN0NY.

### INTRODUCTION

The construction industry and science, namely materials science, play an important role in the field of sustainable development related to ensuring the safety and cleanliness of the natural environment, energy efficiency of construction projects and technologies, reusable use of resources in the creation of infrastructure facilities and the formation of a favorable, comfortable and unique human habitat [1–4]. It is the materials science approaches to the processes of synthesis of materials [3–6] based on the management of the processes of structure for-

mation through the organization of a multi-level system for managing their properties. Therefore, the structural characteristics of building composites currently have a decisive influence on the quality of materials and products obtained on their basis [4].

Materials science tasks in the field of composite synthesis today provide for the establishment, provision and maintenance of the required level of characteristics of materials as a system including a matrix (matrix material) and reinforcing components (reinforcing materials). Targeted management of the organization of multi-level reinforcement is based, first of all, determined by the choice of



components, their ratios and the method of reinforcement at each scale level while maintaining their original characteristics [7]. Moreover, according to P.G. Komokhov [8], it is the type of reinforcement that determines the mechanism for forming a high-strength composite structure. Dispersed strengthening of the binder matrix of artificial stone at the nano- and micro levels with particles up to 1  $\mu\text{m}$  determines the strength and hardness of the composite at the level of the matrix material. The concentration of highly dispersed reinforcing material can reach 20–25%. While the content of fibers that determine the rigidity and strength of the composite at the micro-, meso- and macrolevels can reach 75% or even more.

Dispersed (micro-) reinforcement of the binder matrix in composites is known using polypropylene, glass, basalt or metal fibers [6, 9], acting as microfiber. Reinforcing components can also be filiform crystals of hydrosulfoaluminates [10] carbides, oxides and other compounds.

However, the adhesion of the fiber, as, for example, in the case of using basalt fiber in a cement matrix, when the fiber and cement stone interact at the interface around the fiber, a shell is formed that prevents the adhesion of the matrix and microfiber. G.I. Yakovlev proposed to introduce dispersions of multilayer carbon nanotubes into the composition of the fiber-reinforced concrete mixture, which allow structuring the cement stone along the surface of the reinforcing basalt fibers and thereby develop the contact zone and ensure better adhesion of the stone to the surface of the basalt microfiber. The adhesive interaction of the reinforcing material and the matrix determines the properties of the composite structure with the involvement of structural elements of various sizes in the work, as a result of which the composite works as a single material.

High thermodynamic stability of nanocarbon reinforcing materials and anisotropy determine the efficiency of their use in the composition of dispersion-reinforced composites. However, their high cost and a number of technological aspects hinder their widespread implementation in the construction industry.

It is of interest to use unburned coal as a fulleroid-like reinforcing material, which has undergone high-temperature treatment in thermal power plant boilers and undergone physical and chemical changes. It is formed during the combustion of solid fuel – brown and hard coal, anthracite and is contained in the composition of ash and slag mixtures of hydro-removal, generated as waste at thermal coal power plants [9].

Since, according to various estimates, about 30 million tons of coal combustion products are formed per year during coal combustion in Russia alone, the feasibility of using unburned coal in construction technologies is quite high. So far, the utilization rate of fuel combustion products in our country as a whole does not exceed 10% [3, 9].

Coal ash is one of the largest-tonnage wastes generated as a result of the operation of thermal power plants [14]. So far, the utilization rate of fuel combustion products in our country as a whole does not exceed 10% [3, 7]. In this regard, work is currently being initiated to find all possible effective areas for the use of ash and slag waste from thermal power plants in industrial production [14, 15]. However, among them there are no developments yet aimed at the utilization of unburned waste as a component of binders and mixtures in the production of modern composite materials. Most often, its use is limited to the production of fuel briquettes or other similar materials for combustion as fuel.

Research into the possibility of synthesizing promising construction composites based on unburned coal products isolated from non-recyclable ash and slag mixtures (ASM) of coal plants can ensure a high level of energy efficiency for construction facilities and their production processes.

The objective of this study was to synthesize innovative energy-saving construction composites using enriched underburnt – an isolated component of ash and slag mixtures. A hypothesis was put forward about the interaction of the gypsum matrix, as the most comparable with the fulleroid-like reinforcing carbon technogenic material, the particles of which reach the nanoscale and can be considered as a component of energy-efficient composites for cost-effective production.

During the combustion of coal, various chemical reactions occur in the composition of their mineral part, resulting in the formation of a new technogenic raw material that differs from natural raw materials in chemical and phase composition and has other technological properties.

## MATERIALS AND METHODS

In this study, technogenic carbon (underburnt) was isolated from ash and slag mixtures by flotation enrichment using reagents (flotators). The research used the flotation method used in the mining industry for finely dispersed coal sludge, in which flotation is carried out in two stages.

The conducted studies have shown that multi-stage enrichment and flotation of underburnt from the ZShS TPP from the combustion of brown coals is characterized by a higher consumption of reagents in comparison with the flotation of natural coals. This is an undoubted confirmation of the change in the surface properties of brown coal particles during their combustion.

Electron microscopic studies of the microstructure of underburnt on a scanning electron microscope SEM JEOL JSM-6610LV (Fig. 1) showed that their surface is characterized mainly by increased porosity (Fig. 2), determined by the degree of its thermal transformation in the furnace.





Fig. 1. External view of the scanning electron microscope JEOL JSM-6610LV

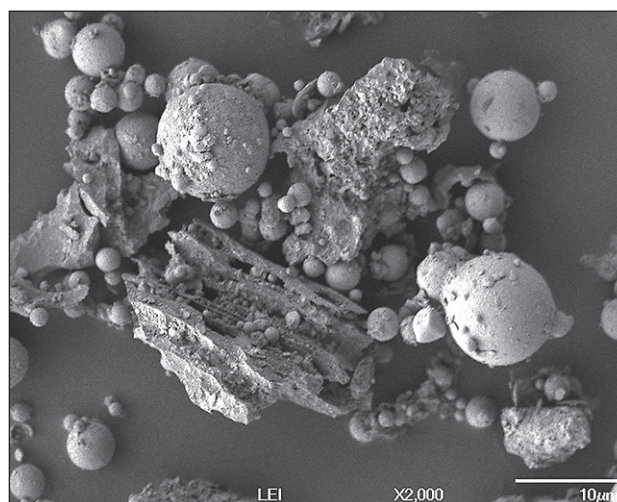
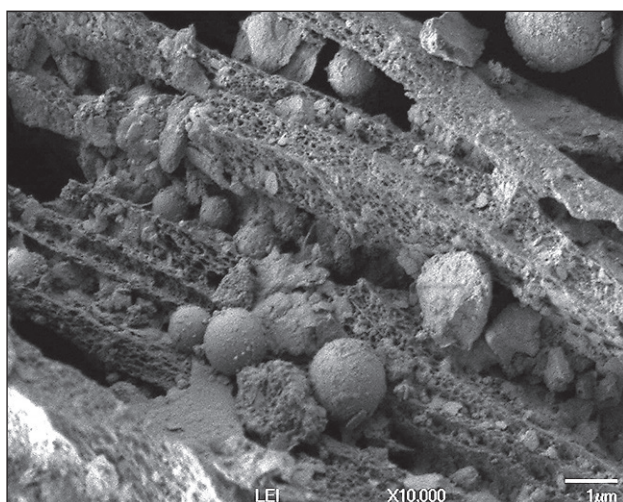


Fig. 2. SEM image of man-made carbon

A typical example of underburnt particles with varying degrees of porosity is shown in microscopic images and dark-field images.

It has been established that unburned carbon is a mesh framework (Fig. 3), which is probably formed during volumetric diffusion of gas during the combustion of brown coal fuel.

It also follows from the data obtained that, since particles of unburned fuel are in the combustion zone or in the temperature zone below 1500–1600°C for a short period of time, then in addition to the carbon skeleton in the composition of the unburned fuel separated from the ash and slag mixture during flotation, there are also individual spheroidal micro- and nanoparticles of aluminosilicates

with the presence of a crystalline and amorphous phase (Fig. 2).

The main crystalline phase is the mullite phase, which is typical for aluminosilicate particles formed during thermochemical transformation during coal combustion in a furnace.

Aluminosilicate inclusions are captured by the mesh structure of carbon. They have a wide size distribution, which is confirmed by the analysis of the granulometric composition and dark-field images of underburnt (Fig. 4). The size distribution of underburnt particles in the composition of the separated mixture, determined using a Winner2005A Intelligent Laser Particle Size Analyzer (Fig. 3), was D10 – 2.02 μm, D50 – 7.34 μm,



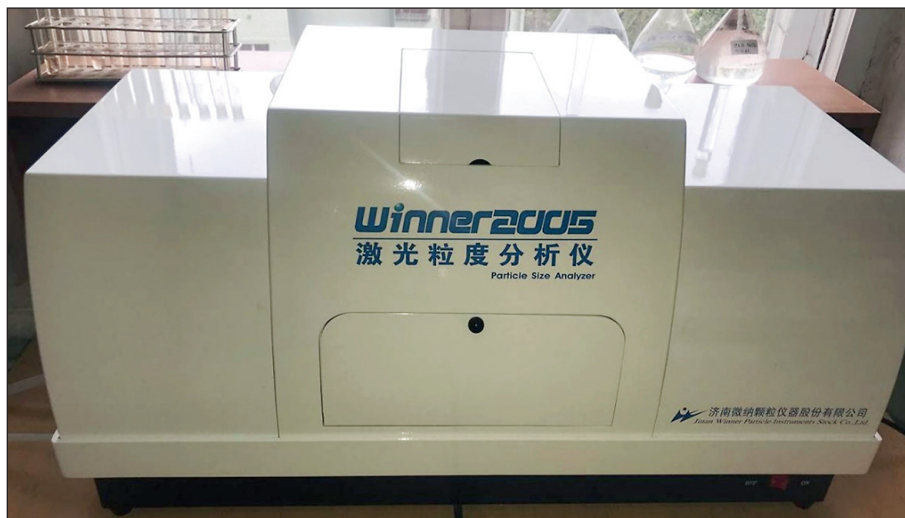


Fig. 3. Winner2005A Intelligent Laser Particle Size Analyzer Appearance

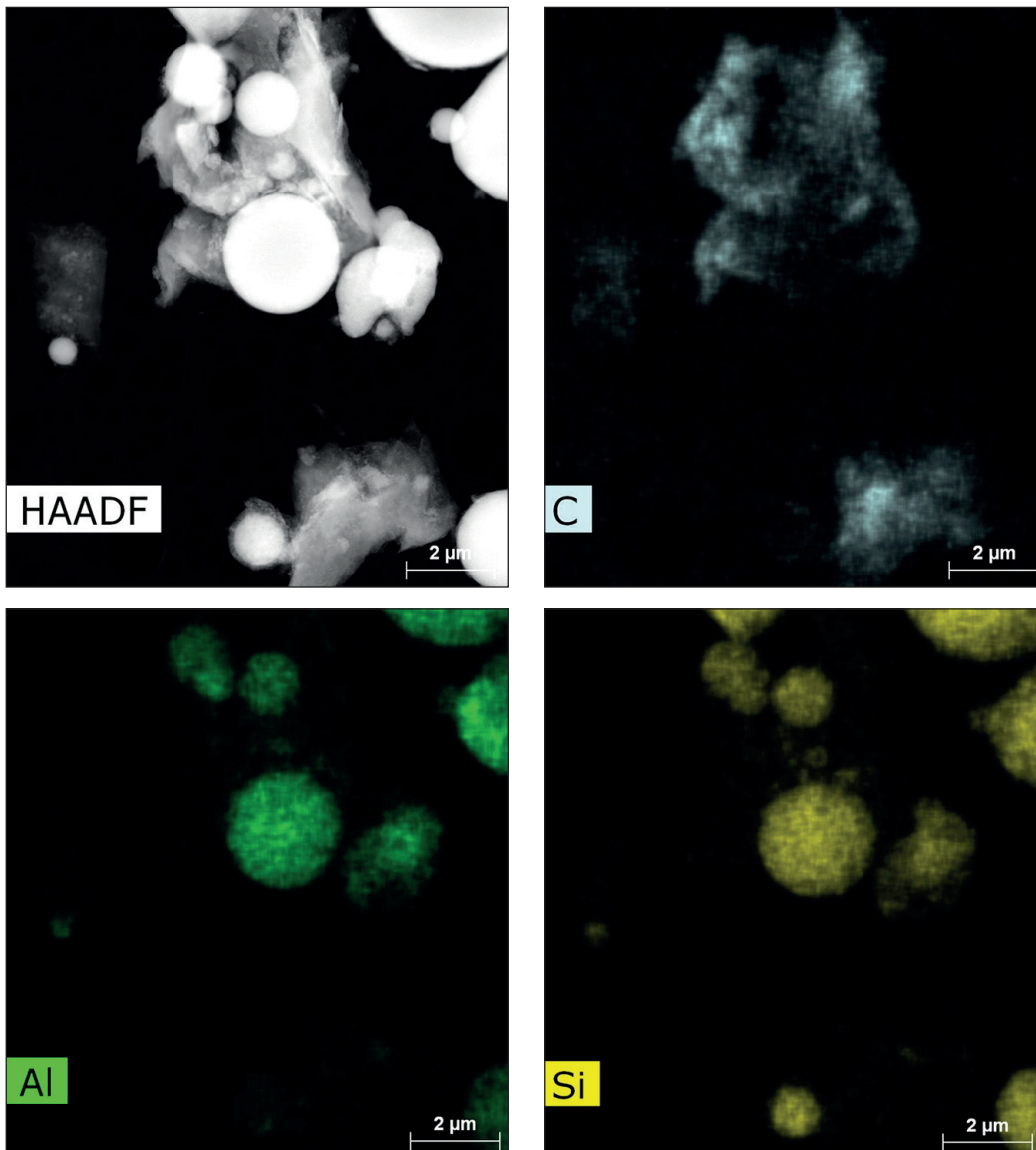


Fig. 4. Dark-field images of a sample of man-made carbon (underburnt) and maps of the distribution of chemical elements in its composition



D0 – 33.56  $\mu\text{m}$ , which differs significantly from the data of other researchers on the sizes of separated fractions (concentrates) from the ash-slag mixture [2].

The study of underburnt particles using a JSM 7401F SEM; TEM/STEM/Osiris (200 kV) electron microscope showed that the spheroid particles are represented by compounds of aluminum and silicon oxides in chemical composition. They are characterized by a compacted vitrified surface of the shell, depending on the degree of its heat treatment in the furnace [16].

High open porosity and developed surface of unburned metamorphosed carbon fuel particles with captured nano- and microparticles contribute to the active crystallization of the gypsum matrix with a modified morphology of crystals (Fig. 5).

Microscopic studies of the structure at high magnification (Fig. 6) confirm morphological changes in the crystals with their transition to tabular fine-crystalline forms.

The experimental studies of the inclusion of underburnt as a substance capable of changing the course of

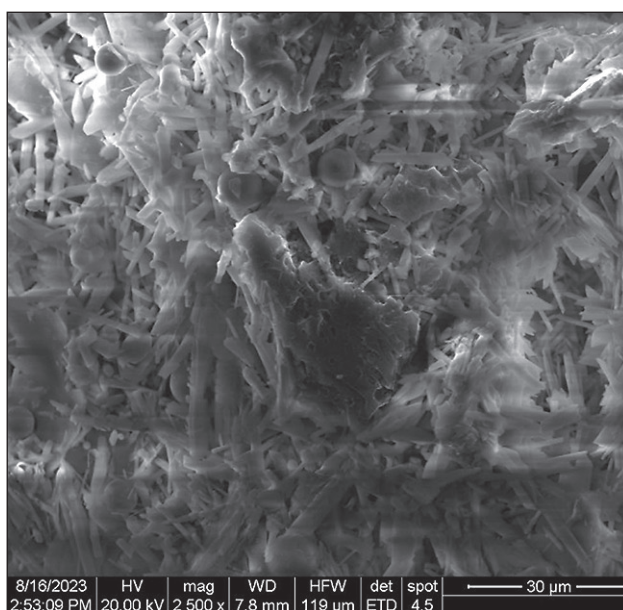


Fig. 5. Amorphized microstructure of gypsum composite

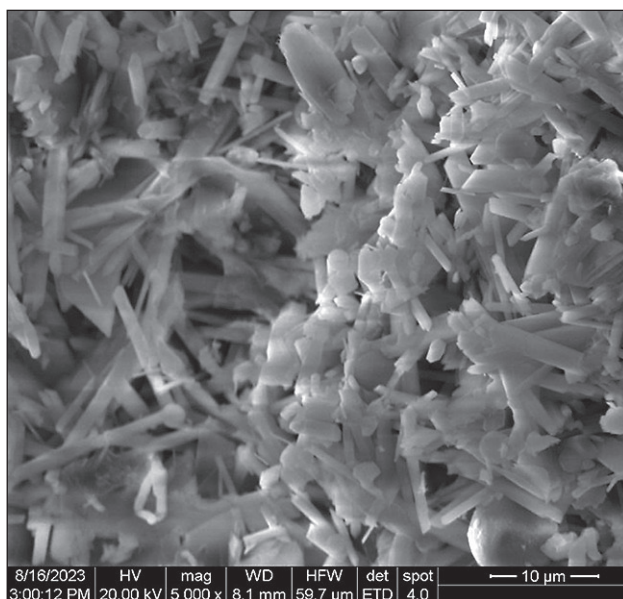
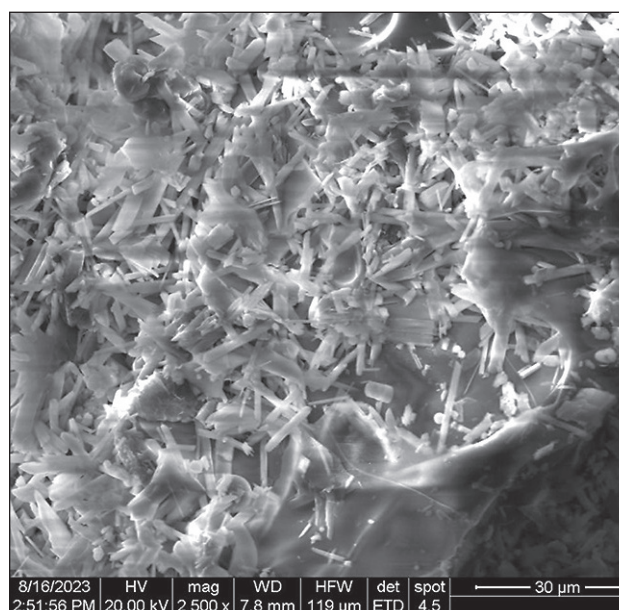
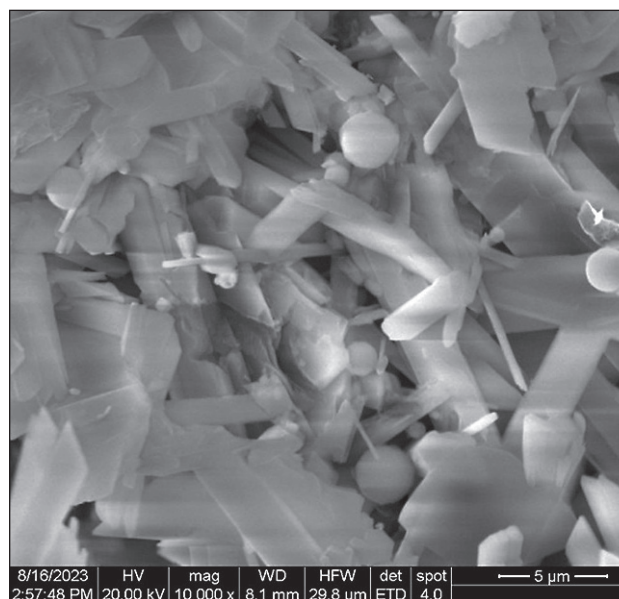


Fig. 6. Electron micrographs of the structure of a gypsum composite with inclusions of nanosized aluminosilicate particles





hydration and structure formation processes in the gypsum matrix and modifying the gypsum stone formed in this case confirmed the accepted hypothesis. An artificial stone with unique properties and structure that meet high energy efficiency requirements in the field of building materials was obtained.

In addition to increasing the overall porosity of the gypsum composite based on underburnt (more than twice), the nature of the porosity also changes. Research using mercury porosimetry methods has established that the introduction of a porous filler in the form of underburnt containing aluminosilicate particles in the structure significantly changes the distribution of pores. In the structure of the obtained artificial stone based on a man-made carbon modifier, pores no larger than 10 microns are observed, which has a beneficial effect on the thermal and structural characteristics of the gypsum composite.

The results of the study of energy-efficient gypsum composites based on a technogenic carbon modifier confirm its active participation in the processes of structure formation and crystallization of nanostructured building materials with high-tech characteristics. Based on a matrix binder and a fulleroid-like technogenic additive, dispersion-hardened gypsum composites were obtained, characterized by a fine-crystalline structure with high closed microporosity. The studies have established that underburnt waste has a unique structure and properties, which can be effectively used for the synthesis of building composites.

## CONCLUSION

Thus, this paper presents research data describing innovative energy-saving building composites for their use in the form of lightweight gypsum structural elements of buildings created by synergistically adding enriched waste from thermal power plants in the form of underburnt (5–30 wt.%) and aluminosilicate ash microspheres present in its composition. Compared with traditional methods, which include the use of technogenic or artificial nanostructuring additives, the underburnt used in this study has undeniable advantages both in terms of cost and in terms of safety and environmental sustainability [12].

The obtained gypsum composites with additives of a fulleroid-like reinforcing material of underburnt demonstrate comparable physical and mechanical characteristics with other gypsum lightweight materials [17, 18] after standard tests.

However, in these composites, with an increase in total porosity, a significant reduction in the average pore size is observed with their transition to the micro- and nanolevel. In this way, these composites compare favorably with the proposed traditional lightweight materials. At the same time, closed porosity increases by more than a third. This will further determine the high performance properties and corrosion resistance of the resulting artificial lightweight gypsum stone.

## REFERENCES

1. Petropavlovskii K., Ratkevich E., Novichenkova T., Petropavlovskaya V. The use of technogenic carbon in gypsum compositions for green building. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403: 03013. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202340303013>
2. Fomenko E.V., Anshits N.N., Vasilieva N.G., Mikhaylova O.A., Rogovenko E.S., Zhizhaev A.M., Anshits A.G. Characterization of fly ash cenospheres produced from the combustion of Ekibastuz coal. *Energy Fuels*. 2015; 29(8): 5390–5403. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01022>
3. Akulova I.I., Artamonova O.V., Goncharova M.A., Korotkikh D.N., Makeev A.I., Slavcheva G.S. Scientific school of the academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences E.M. Chernyshov (in memory of the teacher). Part 2. Scientific and practical developments. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2023; 1 (69): 47–67. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.004>. (In Russian)
4. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Effects of self-microreinforcement of cement stone in the presence of gypsum. *Improving the efficiency of production and application of gypsum materials and products: collection of materials of the X International scientific and practical conference*. 2021. P. 178–183. (In Russian)
5. Zhang W., Che J., Wen P., Xia L., Ma B., Chen J., Wang C. Co-treatment of copper smelting flue dust and arsenic sulfide residue by a pyrometallurgical approach for simultaneous removal and recovery of arsenic. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 416 : 126149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126149>
6. Karpova E.A., Yakovlev G.I., Averkiev I.K., Volkov M.A., Kuzmina N.V., Knyazeva S.A. Effect of carbon black and microsilica on the properties of self-compacting concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2022; 12: 45–51. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-45-51>. (In Russian)
7. Makul N., Fediuk R., Amran M., Al-Akwaa M.S., Pralat K., Nemova D., Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M. Utilization of biomass to ash: an overview of the potential resources for alternative energy. *Materials*. 2021; 14(21): 6482. <https://doi.org/10.3390/ma14216482>



8. Komokhov P.G., Sycheva A.M., Stepanova I.V., Filatov I.P. Classification of nanostructure dimensions and properties of composite materials. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2008; 4: 90-92. (In Russian)
9. Saraikina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I., Senkov S.A., Politaeva A.I. Nanostructuring of cement stone with dispersed reinforcement with basalt fiber. *Stroitel'nye materialy*. 2015; 2: 34-38. (In Russian)
10. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Buryanov A. Gypsum composites reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 032060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032060>
11. Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(9): 1033-1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004>
12. Wang S., Pancheti J., Xi Y., Mahendran M. Lightweight composite gypsum boards with clay mineral and glass fibre for enhanced fire-resistance. *Composites Part B: Engineering*. 2023; 266: 111044. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111044>
13. Li D., Wu D., Xu F., Lai J., Shao L. Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 185: 959-980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.216>
14. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Sulman M., Petropavlovskii K., R. Fediuk, Amran M. Coal ash enrichment with its full use in various areas. *Materials*. 2022; 15(19): 6610. <https://doi.org/10.3390/ma15196610>
15. Hajiyev Sh., Delitsyn L., Kulumbegov R., Popel O., Sulman M., Petropavlovsk K., Firsov S. Pilot tests of coal-fired thermal power plant ash processing. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022; 26(12): 4-9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-12-4-9>. (In Russian)
16. Aladesuyi O., Pal M., Das S.K., Ajanaku K.O. Phase and Microstructural evolution during sintering of mixture of 75:25 Nigeria kaolin and calcined alumina powder compacts. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2016; 8(8): 2682-2838.
17. Peng Y., Unluer C. Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2023; 252: 110492. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110492>
18. Q. Yu, H. Brouwers Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34 (9): 1033-1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Victoria B. Petropavlovskaya** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver, Russia, victoriapetrop@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5412-5576>

**Tatiana B. Novichenkova** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver, Russia, tanovi.69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5771-0842>

**Aleksandr F. Buryanov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, rga-service@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>

**Nadezda A. Lykhanova** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, galcevanadezda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2014-6739>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Victoria B. Petropavlovskaya** – supervision, methodology, data analysis, conclusions.

**Tatiana B. Novichenkova** – experiments; collecting and processing experimental data.

**Aleksandr F. Buryanov** – literature review, graphical and tabular data representation.

**Nadezda A. Lykhanova** – literature review, graphical and tabular data representation.

#### The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 02.09.2024; approved after reviewing 01.10.2024; accepted for publication 07.10.2024.



## Эффективные гипсовые композиции с добавкой недожога золошлаковых смесей

Виктория Борисовна Петропавловская<sup>1</sup> , Татьяна Борисовна Новиченкова<sup>1\*</sup> ,  
Александр Фёдорович Бурьянов<sup>2</sup> , Надежда Алексеевна Лукьянова<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: tanovi.69@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время во всем мире ведутся разработки в области наноструктурного материаловедения. Обоснование целесообразности разработки инновационных энергосберегающих материалов на основе гипсового вяжущего для зданий и сооружений с оптимизированной эмиссией углекислого газа (CO<sub>2</sub>) позволяет рассматривать недожог золошлаковых смесей в качестве перспективного техногенного продукта, позволяющего комплексно решить технологические, экономические и экологические проблемы в строительной индустрии. Исследование возможности синтеза перспективных минеральных композиций на основе продуктов недожога, выделенных из не утилизируемых золошлаковых смесей (ЗШС) угольных станций, обеспечивает развитие базы конструктивных и инженерно-технических решений для зданий и объектов с рациональным энергопотреблением и оптимизированной эмиссией CO<sub>2</sub> с использованием гипсовых наноматериалов, обладающих уникальными свойствами. **Материалы и методы.** В исследовании техногенный углерод (недожог) выделяли из золошлаковых смесей методом флотационного обогащения с применением реагентов (флотаторов). **Результаты и обсуждение.** Результаты исследования энергоэффективных гипсовых композитов на основе техногенного углеродного модификатора подтверждают его активное участие в процессах структурообразования и кристаллизации наноструктурных строительных материалов с высокотехнологичными характеристиками. **Заключение.** Полученные результаты исследований в области создания инновационных энергосберегающих бесцементных композиций для возведения зданий и сооружений будут способствовать повышению уровня знаний и развитию инновационных подходов в области строительного материаловедения для последующего внедрения в строительной отрасли. Тема исследований соответствует реализации государственных программ, в том числе Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** углеродный след, бесцементные композиции, золошлаковые отходы, недожог, наноармирование.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А. Эффективные гипсовые композиции с добавкой недожога золошлаковых смесей // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 397–403. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-397-403>. – EDN: MYNONY.

### ВВЕДЕНИЕ

В решении проблем в области устойчивого развития, связанных с обеспечением сохранности и чистоты природной среды, энергоэффективности строительных объектов и технологий, многоразового использования ресурсов при создании объектов инфраструктуры и формированием благоприятной, комфортной и неповторимой среды обитания человека огромную роль играет строительная индустрия и наука — материаловедение [1–4], а именно

материаловедческие подходы к процессам синтеза материалов [3–6], основанные на управлении процессами структурообразования через организацию многоуровневой системы управления их свойствами. Поэтому структурные характеристики строительных композиций в настоящее время оказывают решающее влияние на качество материалов и изделий, получаемых на их основе [4].

Материаловедческие задачи в области синтеза композитов предусматривают сегодня установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня



характеристик материалов как системы, включающей матрицу (матричный материал) и упрочняющие компоненты (армирующие материалы). Целенаправленное управление организацией многоуровневого армирования основано, прежде всего, на выборе компонентов, их соотношений и способе армирования на каждом масштабном уровне с сохранением их изначальных характеристик [7]. Причем, по мнению П.Г. Комохова [8], именно вид армирования определяет механизм формирования высокопрочной структуры композита. Дисперсное упрочнение вяжущей матрицы искусственного камня на нано- и микроуровнях частицами до 1 мкм определяет прочность, твердость композита на уровне матричного материала. Концентрация высокодисперсного армирующего материала может достигать 20–25%, тогда как содержание волокон, определяющих жёсткость и прочность композита на микро-, мезо- и макроуровнях, может доходить до 75% и даже больше.

Известно дисперсное (микро-) армирование вяжущей матрицы в композитах с помощью полипропиленовых, стеклянных, базальтовых или металлических волокон [6, 9], выступающих в роли микрофибры. Армирующими компонентами также могут быть нитевидные кристаллы гидросульфаталюминатов [10] карбидов, оксидов и других соединений.

Однако при сцеплении волокна и вяжущего, как, например, в случае применения базальтового волокна в цементной матрице, при взаимодействии волокна и цементного камня на границе раздела сред, вокруг волокна возникает оболочка, препятствующая сцеплению матрицы и микрофибры. Г.И. Яковлевым предложено вводить в состав фибробетонной смеси дисперсии многослойных углеродных нанотрубок, позволяющих структурировать цементный камень по поверхности армирующих базальтовых волокон и тем самым развить контактную зону и обеспечить лучшее сцепление камня с поверхностью базальтовой микрофибры. Адгезионное взаимодействие армирующего материала и матрицы определяет свойства структуры композита с вовлечением в работу различных по размерам структурных элементов, в результате чего композит работает как единый материал.

Высокая термодинамическая устойчивость нанотрубок армирующих материалов и анизотропия определяют эффективность их применения в составе дисперсно-армированных композитов. Однако их высокая стоимость и ряд технологических аспектов затрудняют их широкое внедрение в строительной индустрии.

Альтернативой нанотрубок армирующим материалам могут служить легкие регенерируемые материалы — легкие заполнители. Они используются в бетонах и гипсовых материалах для снижения те-

плопроводности. Частицы легкого материала представляют собой довольно закрытые полые сферы, обеспечивающие низкую плотность и хорошую теплоизоляцию [11].

Легкие заполнители могут быть получены из пустой породы или угольного шлама путем дробления, измельчения, комкования (в зависимости от потребности) и прокаливания [12, 13].

Получение композиции на основе  $\beta$ -полугидрата из серогипса, полученного при десульфурации дымовых газов и легких заполнителей, позволило добиться низкой теплопроводности при обеспечении достаточно высоких технических и эксплуатационных характеристик облегченного гипсового камня, в том числе прочности, плотности, удельной теплоемкости и огнестойкости [11].

Представляет интерес использование в качестве фулероидоподобного армирующего материала недожога, прошедшего в котлах тепловых электростанций высокотемпературную обработку и претерпевшего при этом физико-химические изменения. Он образуется при сжигании твердого топлива — бурых и каменных углей, антрацита — и содержится в составе золошлаковых смесей гидроудаления, образующихся в виде отходов на тепловых угольных электростанциях [9].

Поскольку, по разным оценкам, при сжигании угля только в России образуется порядка 30 млн тонн продуктов сгорания угля в год, то целесообразность применения недожога в строительных технологиях достаточно высока. Пока коэффициент использования продуктов сгорания топлива в нашей стране в целом не превышает 10% [3, 9].

Угольная зола — один из самых крупнотоннажных отходов, образующийся в результате работы тепловых электростанций [14]. Пока коэффициент использования продуктов сгорания топлива в нашей стране в целом не превышает 10% [3, 7]. В этой связи в настоящее время иницируются работы по поиску всевозможных эффективных направлений по применению золошлаковых отходов ТЭС в промышленном производстве [14, 15]. Однако среди них пока не присутствуют разработки, направленные на утилизацию недожога как компонента вяжущих и смесей в производстве современных композиционных материалов. Чаще всего его применение ограничивается получением топливных брикетов или других подобных материалов для сжигания в качестве топлива.

Исследование возможности синтеза перспективных строительных композитов на основе продуктов недожога, выделенных из не утилизируемых золошлаковых смесей (ЗШС) угольных станций, может обеспечить высокий уровень энергоэффективности объектам строительного комплекса и процессам их производства.



Цель данного исследования заключалась в синтезе инновационных энергосберегающих строительных композитов с использованием обогащенного недожога — выделенного компонента золошлаковых смесей. Была выдвинута гипотеза о взаимодействии гипсовой матрицы как наиболее сопоставимым с фуллероидоподобным армирующим углеродным техногенным материалом, частицы которого доходят до наноразмерного масштаба и могут рассматриваться в качестве компонента энергоэффективных композитов для рентабельного производства.

В процессе сгорания углей в составе их минеральной части протекают различные химические реакции, в результате чего образуется новое техногенное сырьё, отличающееся от природного сырья по химическому и фазовому составу и обладающее другими технологическими свойствами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях был использован метод флотации, применяемой в горной промышленности для тонкодисперсных угольных шламов, в котором флотация осуществляется в две стадии.

Проведенные исследования показали, что многостадийное обогащение и флотация недожога из ЗШС ТЭС от сжигания бурых углей отличается более высоким расходом реагентов в сравнении с флотацией природных каменных углей. Это является несомненным подтверждением изменения поверхностных свойств буроугольных частиц в процессе их горения.

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры недожога на растровом электронном микроскопе РЭМ JEOL JSM-6610LV (рис. 1) показали, что их поверхность отличается преимущественно повышенной пористостью (рис. 2), определяющейся степенью ее термического преобразования в топке.

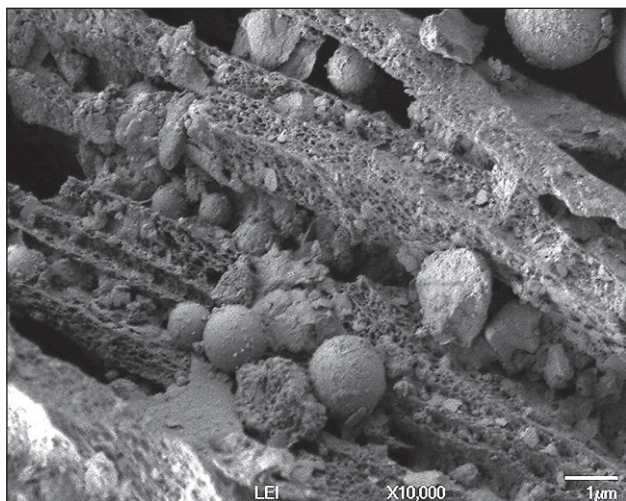


Рис. 2. РЭМ изображение техногенного углерода



Рис. 1. Внешний вид растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV

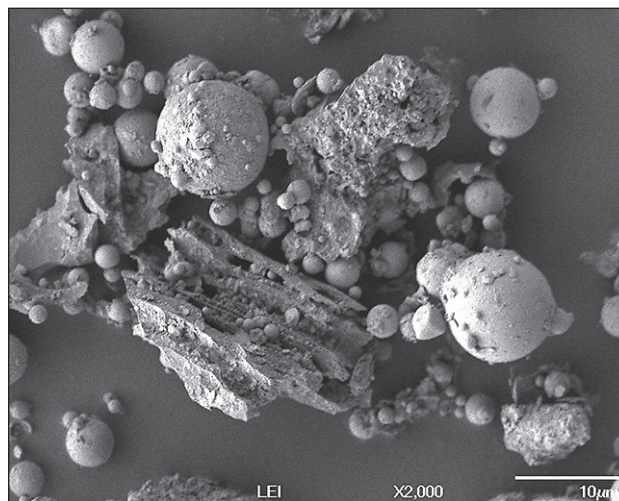
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерный пример частиц недожога с разной степенью пористости представлен на микроскопических снимках и темнопольных изображениях.

Установлено, что несгоревший углерод представляет собой сетчатый каркас (рис. 3), который, вероятно, образуется при объёмной диффузии газа в процессе сжигания буроугольного топлива.

Из полученных данных следует также, что, поскольку частицы несгоревшего топлива находятся в зоне горения или в температурной зоне менее 1500–1600°C в течение короткого промежутка времени, то помимо углеродного скелета в составе выделенного из золошлаковой смеси при флотации недожога присутствуют и отдельные сфероидальные микро- и наночастицы алюмосиликатов с присутствием кристаллической и аморфной фазы (рис. 2).

Основной кристаллической фазой является фаза муллита, что характерно для алюмосиликатных ча-





стиц, образующихся в ходе термохимического преобразования при сжигании углей в топке.

Алюмосиликатные включения захвачены сетчатой структурой углерода. Они имеют широкое распределение по размерам, что подтверждается анализом гранулометрического состава и темнопольными снимками недожога (рис. 4). Распределение частиц недожога по размерам в составе выделенной смеси, определенное с применением лазерного анализатора частиц Winner2005A Intelligent Laser Particle Size Analyzer (рис.3), составило D10 – 2.02 мкм, D50 – 7.34 мкм, D0 – 33.56 мкм, что существенно различается с данными других исследователей по размерам выделяемых фракций (концентратов) из ЗШС [2].

Исследование частиц недожога с использованием электронного микроскопа РЭМ JSM 7401F; ПЭМ/ПРЭМ/ Osiris (200 kV) показало, что сферические частицы по химическому составу представлены со-

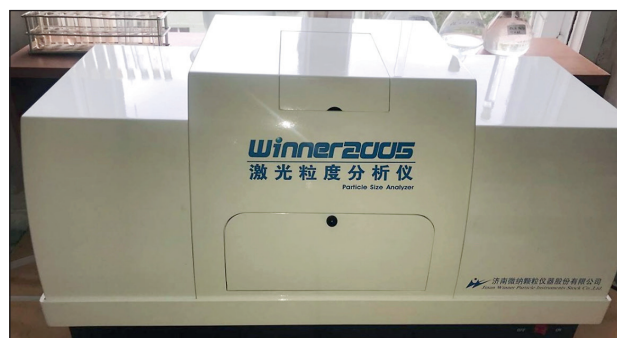


Рис. 3. Внешний вид Winner2005A Intelligent Laser Particle Size Analyzer

единениями оксидов алюминия и кремния. Они характеризуются уплотненной остеклованной поверхностью оболочки, зависящей от степени ее термообработки в топке [16].

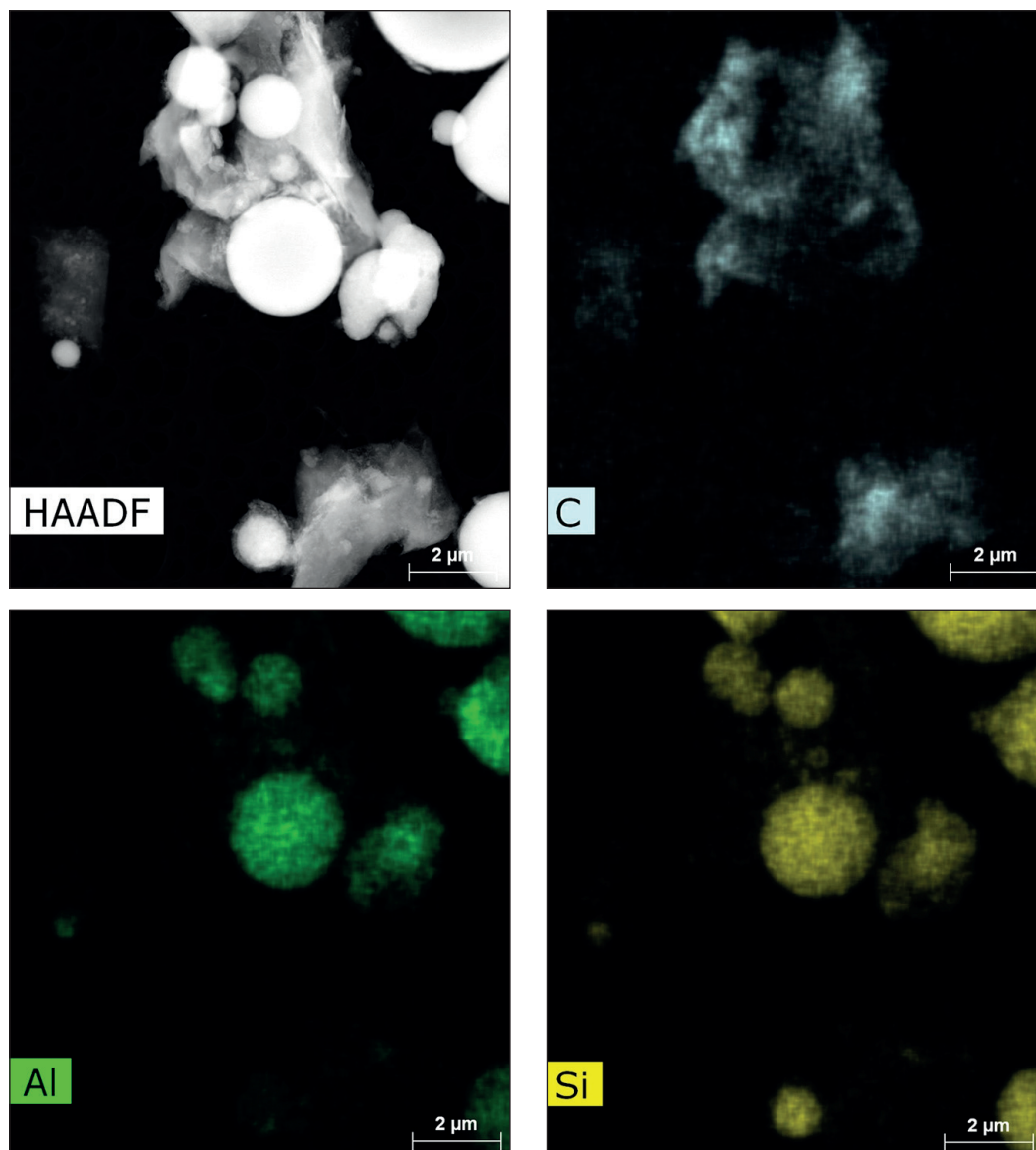


Рис. 4. Темнопольные изображения образца техногенного углерода (недожога) и карты распределения химических элементов в его составе



Высокая открытая пористость и развитая поверхность несгоревших метаморфизированных углеродных частиц топлива с захваченными нано- и микро-частицами способствует активной кристаллизации гипсовой матрицы с измененной морфологией кристаллов (рис. 5).

Микроскопические исследования структуры при большом увеличении (рис. 6) подтверждают морфологические изменения кристаллов с переходом их к таблитчатым мелкокристаллическим формам.

Выполненные экспериментальные исследования включения недожога как вещества, способного изменить ход протекания процессов гидратации и структурообразования гипсовой матрицы и моди-

фицировать формирующийся при этом гипсовый камень, подтвердили принятую гипотезу. Получен искусственный камень, обладающий уникальными свойствами и структурой, отвечающих высоким требованиям по энергоэффективности в области строительных материалов.

Помимо увеличения общей пористости гипсового композита на основе недожога (более чем в два раза) изменяется и характер пористости. Исследованиями методами ртутной порометрии установлено, что введение пористого наполнителя в виде недожога с содержанием алюмосиликатных частиц в структуре заметно меняет распределение пор. В структуре получаемого искусственного камня на основе тех-

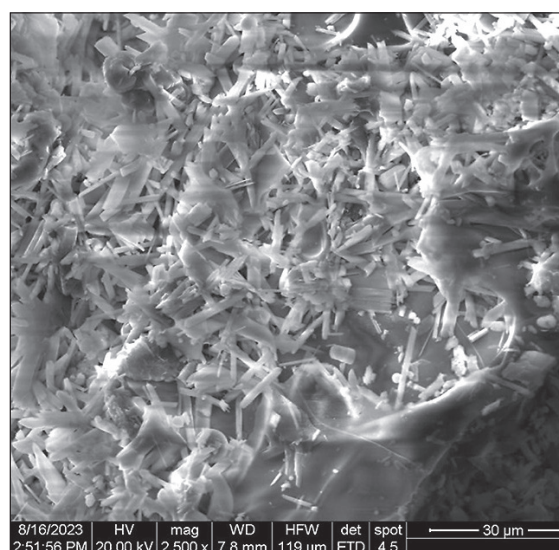
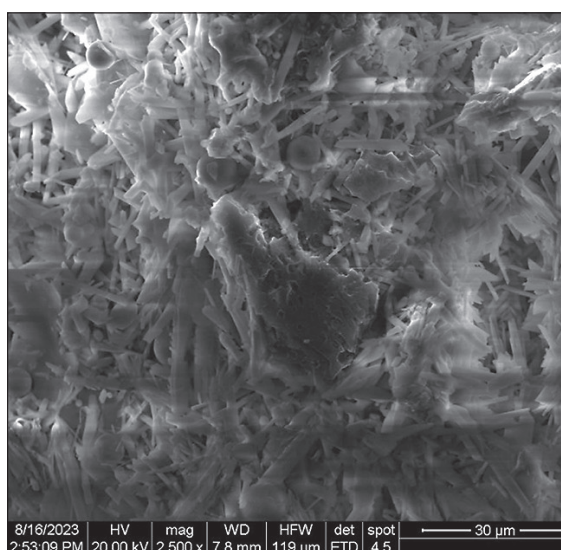


Рис. 5. Аморфизированная микроструктура гипсового композита

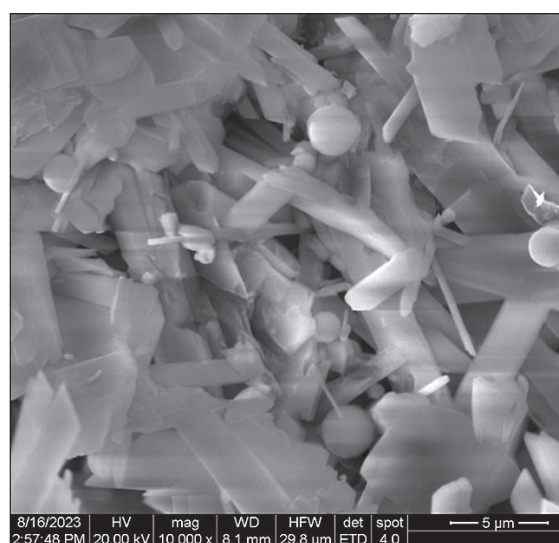
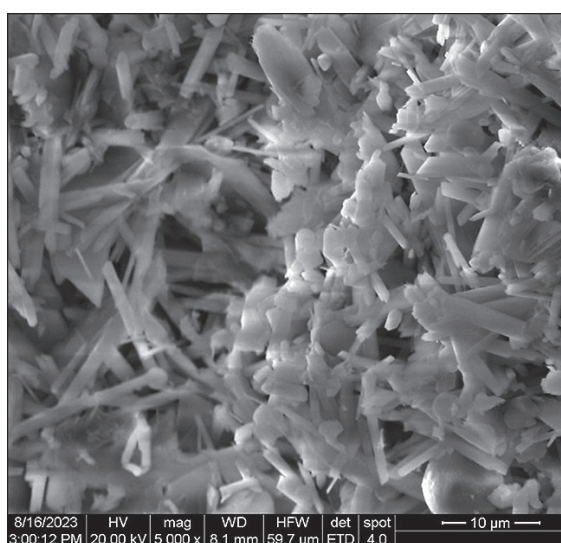


Рис. 6. Электронные микрофотографии структуры гипсового композита с включениями наноразмерных алюмосиликатных частиц



ногенного углеродного модификатора наблюдаются поры размером не более 10 мкм, что благоприятно отражается на теплофизических и структурных характеристиках гипсового композита.

Результаты исследования энергоэффективных гипсовых композитов на основе техногенного углеродного модификатора подтверждают его активное участие в процессах структурообразования и кристаллизации наноструктурных строительных материалов с высокотехнологичными характеристиками. На основе матричного вяжущего и фулероидоподобной техногенной добавки получены дисперсно-упрочненные гипсовые композиты, характеризующиеся мелкокристаллической структурой с высокой закрытой микропористостью. Исследованиями установлено, что отход недожог обладает уникальной структурой и свойствами, что может быть эффективно использовано для синтеза строительных композитов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе приводятся данные исследований с описанием инновационных энергосберегающих строительных композитов для их использования в виде облегченных гипсовых конструктивных элементов зданий, созданных

путем синергетического добавления обогащенных отходов тепловых электростанции в форме недожога (5–30 мас.%) и присутствующих в его составе алюмосиликатных зольных микросфер. По сравнению с традиционными методами, которые включают использование техногенных или искусственных наноструктурирующих добавок, недожог, применяющийся в данном исследовании, имеет неоспоримые преимущества как по критерию стоимости, так и по критериям безопасности и экологической устойчивости [12].

Полученные гипсовые композиты с добавками фулероидоподобного армирующего материала недожога демонстрируют свойства, сопоставимые с другими гипсовыми облегченными материалами [17, 18] с точки зрения их физико-механических характеристик после стандартных испытаний.

Однако в данных композитах наблюдается при увеличении общей пористости значительное сокращение среднего размера пор с их переходом на микро- и наноровень. Этим данные композиты выгодно отличаются от предлагаемых традиционных облегченных материалов. При этом более чем на треть увеличивается закрытая пористость. Это в дальнейшем будет обуславливать высокие эксплуатационные свойства и коррозионную стойкость получаемого искусственного облегченного гипсового камня.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Petropavlovskii K., Ratkevich E., Novichenkova T., Petropavlovskaya V. The use of technogenic carbon in gypsum compositions for green building. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403: 03013. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202340303013>
2. Fomenko E.V., Anshits N.N., Vasilieva N.G., Mikhaylova O.A., Rogovenko E.S., Zhizhaev A.M., Anshits A.G. Characterization of fly ash cenospheres produced from the combustion of Ekibastuz coal. *Energy Fuels*. 2015; 29(8): 5390–5403. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01022>
3. Акулова И.И., Артамонова О.В., Гончарова М.А., Коротких Д.Н., Макеев А.И., Славчева Г.С. Научная школа академика РААСН Е.М. Чернышова (памяти учителя). Часть 2. Научно-практические разработки // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2023. 1 (69). 47–67. — <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.004>
4. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Эффекты самомикроармирования цементного камня в присутствии гипса // *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий: сборник материалов X Международной научно-практической конференции*. 2021. С. 178–183.
5. Zhang W., Che J., Wen P., Xia L., Ma B., Chen J., Wang C. Co-treatment of copper smelting flue dust and arsenic sulfide residue by a pyrometallurgical approach for simultaneous removal and recovery of arsenic. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 416 : 126149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126149>
6. Карпова Е.А., Яковлев Г.И., Аверкиев И.К., Волков М.А., Кузьмина Н.В., Князева С.А. Влияние технического углерода и микрокремнезема на свойства самоуплотняющегося бетона // *Строительные материалы*. 2022. 12. 45–51. — <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-45-51>
7. Makul N., Fediuk R., Amran M., Al-Akwaa M.S., Pralat K., Nemova D., Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M. Utilization of biomass to ash: an overview of the potential resources for alternative energy. *Materials*. 2021; 14(21): 6482. <https://doi.org/10.3390/ma14216482>



8. Комохов П.Г., Сычева А.М., Степанова И.В., Филатов И.П. Классификация размерностей наноструктур и свойства композиционных материалов // *Academia. Архитектура и строительство*. 2008. 4. 90–92.
9. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И., Сеньков С.А., Политаева А.И. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // *Строительные материалы*. 2015. 2. 34–38.
10. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Buryanov A. Gypsum composites reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 032060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032060>
11. Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(9): 1033–1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004>
12. Wang S., Pancheti J., Xi Y., Mahendran M. Lightweight composite gypsum boards with clay mineral and glass fibre for enhanced fire-resistance. *Composites Part B: Engineering*. 2023; 266: 111044. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111044>
13. Li D., Wu D., Xu F., Lai J., Shao L. Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 185: 959–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.216>
14. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Sulman M., Petropavlovskii K., R. Fediuk, Amran M. Coal ash enrichment with its full use in various areas. *Materials*. 2022; 15(19): 6610. <https://doi.org/10.3390/ma15196610>
15. Гаджиев Ш., Делицын Л., Кулумбеков Р., Попель О., Сульман М., Петропавловский К., Фирсов С. Опытнo-промышленные испытания переработки золы угольных ТЭС // *Экология и промышленность России*. 2022. 26(12). 4–9. – <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-12-4-9>
16. Aladesuyi O., Pal M., Das S.K., Ajanaku K.O. Phase and Microstructural evolution during sintering of mixture of 75:25 Nigeria kaolin and calcined alumina powder compacts. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2016; 8(8): 2682–2838.
17. Peng Y., Unluer C. Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2023; 252: 110492. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110492>
18. Q. Yu, H. Brouwers Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34 (9): 1033–1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Петропавловская Виктория Борисовна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия, victoriapetrop@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5412-5576>

**Новиченкова Татьяна Борисовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия, tanovi.69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5771-0842>

**Бурьянов Александр Фёдорович** – доктор технических наук, доцент, консультант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, rga-service@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>

**Лукьянова Надежда Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, galcevanadezda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2014-6739>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Петропавловская В.Б.** – научное руководство; разработка методологии исследования; анализ результатов, составление заключения.

**Новиченкова Т.Б.** – проведение экспериментальной работы; сбор и обработка экспериментальных данных.

**Бурьянов А.Ф.** – литературный обзор, обработка и анализ экспериментальных данных.

**Лукьянова Н.А.** – литературный обзор, обработка и анализ экспериментальных данных.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024; принята к публикации 07.10.2024.



## Influence of the technological conditions of detonation coatings application on their phase composition

Vyacheslav V. Sirota<sup>1</sup> , Sergey E. Savotchenko<sup>1,2</sup> , Valeria V. Strokovaya<sup>1\*</sup> , Diana O. Bondarenko<sup>1</sup> , Daniil S. Podgorny<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

\* Corresponding author: e-mail: [vvstrokovaya@gmail.com](mailto:vvstrokovaya@gmail.com)

### ABSTRACT

**Introduction.** Detonation spraying is an effective method for applying high-quality coatings to various materials, widely used in industry to improve wear resistance and corrosion resistance of surfaces. This article examines the influence of key process parameters, such as gun-to-substrate distance and nozzle velocity, on the structure and properties of the resulting coatings.

**Materials and methods of research.** The Ti–TiO<sub>2</sub> coatings on hot-rolled carbon steel are studied. The spray distance and the speed of nozzle passage are varied while the rest spraying parameters are fixed. The obtained coatings were studied using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Results and discussion.** It is found that the phase composition of the coating changes depending on the detonation spray conditions. The fraction of rutile exceeds the fraction of anatase in the obtained samples except for the samples obtained with the fastest nozzle passage. The rutile fraction monotonically decreases with an increase in the spray distance with fixed values of the rest parameters of spraying process. It is found a nonmonotonic changing the rutile fraction with an increase in the speed of nozzle passage and found its optimal values. Two new theoretical models for the spray process based on differential equations are proposed, the solutions of which sufficiently describe the dependencies of the rutile fraction on the distance and speed of the nozzle, respectively. **Conclusion.** It has been demonstrated that the theoretical values of the parameters, calculated using the formulated equations, are in good agreement with the experimentally measured values.

**KEY WORDS:** Ti–TiO<sub>2</sub>, composite coatings, detonation spray coating process, phase composition, anatase, rutile, X-ray diffraction analysis, spray distance, the speed of nozzle passage

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The study was carried out within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2023-0006 using equipment of the Center of High Technologies of the Belgorod V. G. Shukhov State Technological University and Joint Research Center “Technologies and Materials” of the Belgorod National Research University.

### FOR CITATION:

Sirota V.V. Savotchenko S.E. Strokovaya V.V. Bondarenko D.O. Podgorny D.S. Influence of the technological conditions of detonation coatings application on their phase composition. *Nanotechnologies in construction*. 2024; 16(5): 404–414. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-404-414>. – EDN: LOONGJ.

### INTRODUCTION

Optimizing the technological parameters of coating deposition to achieve the desired characteristics is an important practical challenge [1]. One of the widely used methods for applying ceramic coatings is the of detonation spraying method [2–4], including those based on titanium dioxide [5–7].

Detonation spraying is a process in which coatings are formed by accelerating the sprayed powder by a blast wave generated by the combustion of flammable gas with a frequency of 1 to 100 times per second. The flammable gas enters the gun barrel, where the sprayed powder is fed, the powder accelerates and forms a continuous coating when it hits the substrate. The coatings obtained by this method are characterized by low porosity, high density



and adhesive strength. In this case, mineral (from silicate, aluminate and other rocks), oxides (including synthetic) and metal powders can be used as raw materials. Various metals and alloys, ceramics, building materials (based on Portland cement and magnesia cement), glass, various plastics and polymer glasses can be used as substrates. Separately, it is worth noting the higher economic efficiency of this method compared to HVOF [8].

The key parameters in the process of detonation spraying that influence the characteristics of the resulting coating are: the speed of passage of the gun nozzle along the substrate, the spraying distance, the used combustible gases, the morphology and thermophysical properties of the initial powder used.

Many authors investigate the influence various parameters of detonation spray process on the properties of the coatings [9–11]. In particular, the authors of [12] study the effects of oxygen fuel rate on microstructure of detonation sprayed coatings. Effects of plasma spray parameters on  $\text{TiO}_2$ -coated mild steel are reported in [13]. Effects of substrate temperature and precursor amount on the properties including microstructure of  $\text{TiO}_2$  thin films are presented in [14, 15].

Phase composition of formed coatings can be controlled by the condition of spray process [16]. An important characteristic is the ratio of anatase and rutile phases for coatings based on titanium dioxide [17].

In our recent paper [18], composite coatings based on titanium oxides were successfully obtained by detonation spraying and their microstructure, phase composition and photocatalytic activity were investigated. The coating based on  $\text{Ti-TiO}_2$  is photocatalytic coatings which includes the nanosized particles abling to decompose the molecules of many pollutants due to the formation of  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ , decomposing organic matter into  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  killing algae, fungi and bacteria under the action of radiation, ultraviolet or visible spectrum [19, 20].

In this paper, we investigate the effect of detonation spray technology condition of  $\text{Ti-TiO}_2$  composite coating on metal substrate. The detonation spray coating technology we use makes it easy to vary such parameters as the distance from the nozzle to the surface (spray distance) and the speed of nozzle passage. Finding the optimal values of the technological parameters of detonation spraying make it possible to obtain coatings with the given phase fractions of rutile and anatase necessary to ensure the required photocatalytic properties.

## METHODS AND MATERIALS

The hot-rolled carbon steel St3 (National Standard 380-2005, Russia) was chosen as the substrate for the coating because the metal products made from St3 take the leading place in terms of the volume of all consumed ferrous metal. Note that steel grade A57036 (ASTM/ASME, USA) is closest in composition to St3 steel. A comparison of the elemental compositions of these steels is given in Table 1.

Steel samples  $40 \times 40$  mm were made. The target surface was degreased and sandblasted before spray processing. The samples were processed in an air environment. We form the coatings with the thickness about of 100–150  $\mu\text{m}$ .

The titanium powder of PTS-1 grade (JSC Polema, Russia) is used for spraying. A fraction of 40–60  $\mu\text{m}$  was preliminarily selected by the sieve method. The results of studying the granulometric composition of the titanium powder of PTS-1 grade (particle size integral (dot line) and differential (solid line) distributions) are shown in Figure 1. The results of X-ray phase analysis of the titanium powder are given in your previous paper [18].

Formation of the  $\text{Ti-TiO}_2$  composite coating was carried out using a robotic complex for detonation spraying of coatings (IntelMashin LLC, Moscow, Russia) equipped with a multi-chamber detonation accelerator (MCDS) [21].

The fixed values of parameters of the coating deposition by a robotic complex for detonation spraying of coatings are following: barrel length is 300 mm, barrel diameter is 18 mm, powder feed rate is 300 g/h. Flow rates of fuel mixture components are following: air – 1.37  $\text{m}^3/\text{h}$ , oxygen – 2.48  $\text{m}^3/\text{h}$ , propane (30 %) + butane (70 %) – 0.59  $\text{m}^3/\text{h}$ , (cylindrical form combustion chamber).

The spray distance and speed of nozzle passage are varied parameters from 40 to 80, mm, and from 600 to 2000 mm/min, respectively. Five samples are sprayed under each condition. The average values of 5 tests are taken as the measurement results.

We control the microstructure of obtained coatings by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) using Tescan MIRA3 LMU (Czech Republic).

The study of the phase composition of the coating was carried out using the ARL 9900 series X-ray fluorescence spectrometer (Thermo Fisher Scientific, Basel, Switzer-

Table 1

The elemental compositions of St3 and A57036 steels

	Si	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	N	As	Fe
St3	0.15–0,3	0.14–0.22	0.4–0.65	0.05	0.04	0.3	0.3	0.3	0.008	0.08	rest
A57036	–	0.25	0.9	0.05	0.04	–	–	0,2	–	–	rest



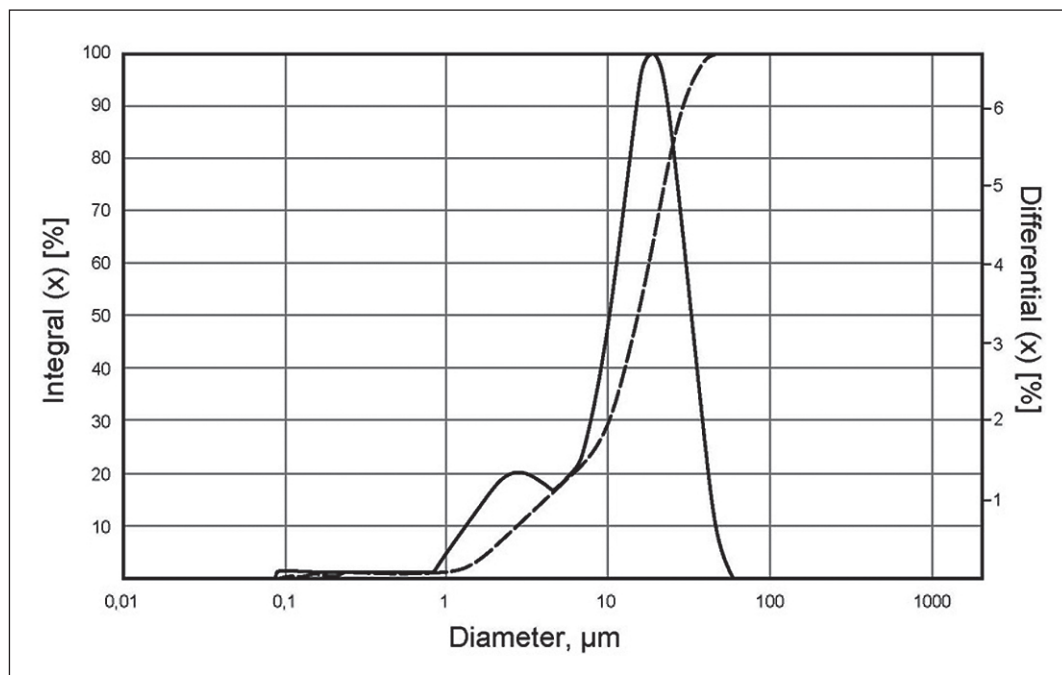


Fig. 1. The granulometric composition of the titanium powder of PTS-1 grade (particle size integral (dot line) and differential (solid line) distributions)

land). Quantitative analysis of the proportion of identified phases in X-ray diffraction studies was carried out using the Rietveld method using Siroquantv.3 software.

## RESULTS AND DISCUSSION

There are several mechanisms that characterize changes in the phase fraction depending on the spray distance and deposition rate in coatings. First of all, as the spray distance increases, the temperature of the flow that hits the substrate decreases. Also, the kinetic energy of the powder particles decreases with an increase in the spray distance. This reduces the temperature when the kinetic energy of the powder transforms into thermal energy.

The speed of passage of the gun nozzle is also important. As the speed increases, the exposure time of the flow to the substrate surface decreases. During these processes, phase transitions  $\text{Ti} \rightarrow \text{TiO}_x$  occur less intensely or do not occur at all due to a decrease in temperature during coating formation.

The results of EDS and SEM analysis of the  $\text{Ti-TiO}_2$  composite coatings are presented in Figures 2–5. SEM images with a visible field of 1000 and 5000  $\mu\text{m}$  (Figures 2–5, c, d) show a developed surface represented mainly by titanium oxides with spherical titanium inclusions 5–25  $\mu\text{m}$  in size. When increasing to a visible field of 100  $\mu\text{m}$  (Figures 2–5, b), a uniform distribution of various phases ( $\text{Ti-TiO}_x$ ) with smooth transitions is observed. At the same time, the surface structure is more developed than in macro photographs, which is

due to the scattering of titanium particles when they hit the surface.

The resulting “titanium splashes” tend to intensify oxidation with the formation of higher titanium oxides ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ti}_3\text{O}_5$ ...). At the same time, at the points of impact, films in the form of metallic titanium and its lower oxides ( $\text{Ti}_6\text{O}$ ,  $\text{Ti}_3\text{O}$ ...) are often visible, which is evident from the smooth change in image shades between metallic titanium and the higher oxide ( $\text{TiO}_2$ ).

This fact is also confirmed by EDS images presented in Figures 2–5, a. These images show a chaotic distribution of both titanium and oxygen. At the same time, 3 main shades are visually distinguishable in the images, which are represented by: metallic titanium, titanium dioxides (anatase, rutile, brookite) and the transition phase  $\text{TiO}_x$ , where  $x = 0.7–1.3$ .

Results of SEM analysis allow obtaining the averaged elemental composition of coatings from a visible field of 1000 microns sprayed under different regimes. In particular, the average fraction of titanium increased by 1.8% (from 39.3 to 37.5%), and the average fraction of oxygen decreased by 1.7% (from 62.3 to 60.6%) when the deposition distance increased from 40 to 80 mm, at a constant speed of passage of the detonation nozzle of 1500 mm/min. Consequently, doubling the spraying distance leads to an increase in the average fraction of titanium by approximately 2% and a decrease in the average fraction of oxygen by approximately the same amount.

The average fraction of titanium decreased by 4.7% (from 48.0 to 43.3%), and the average fraction of oxy-



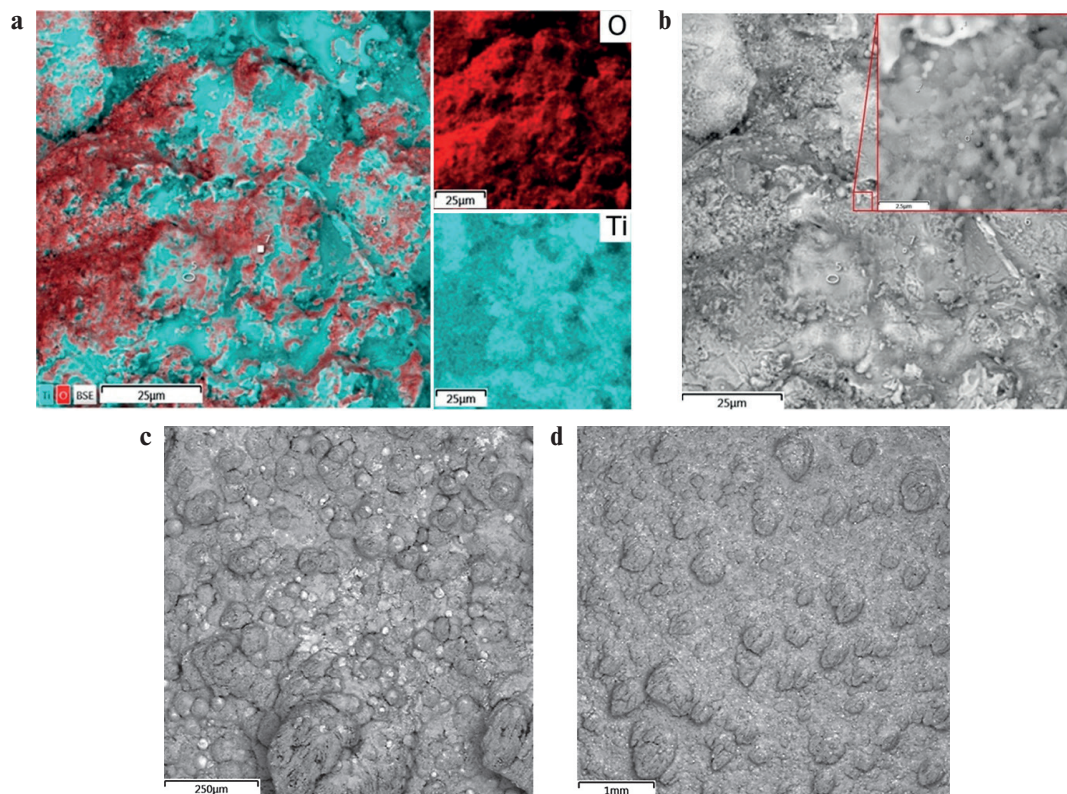


Fig. 2. EDS (a) and SEM images with visible field of 100  $\mu\text{m}$  (b), 1000  $\mu\text{m}$  (c), 5000  $\mu\text{m}$  (d) of coatings obtained with the speed of nozzle passage of 1500 mm/min, and the spray distance of 40 mm

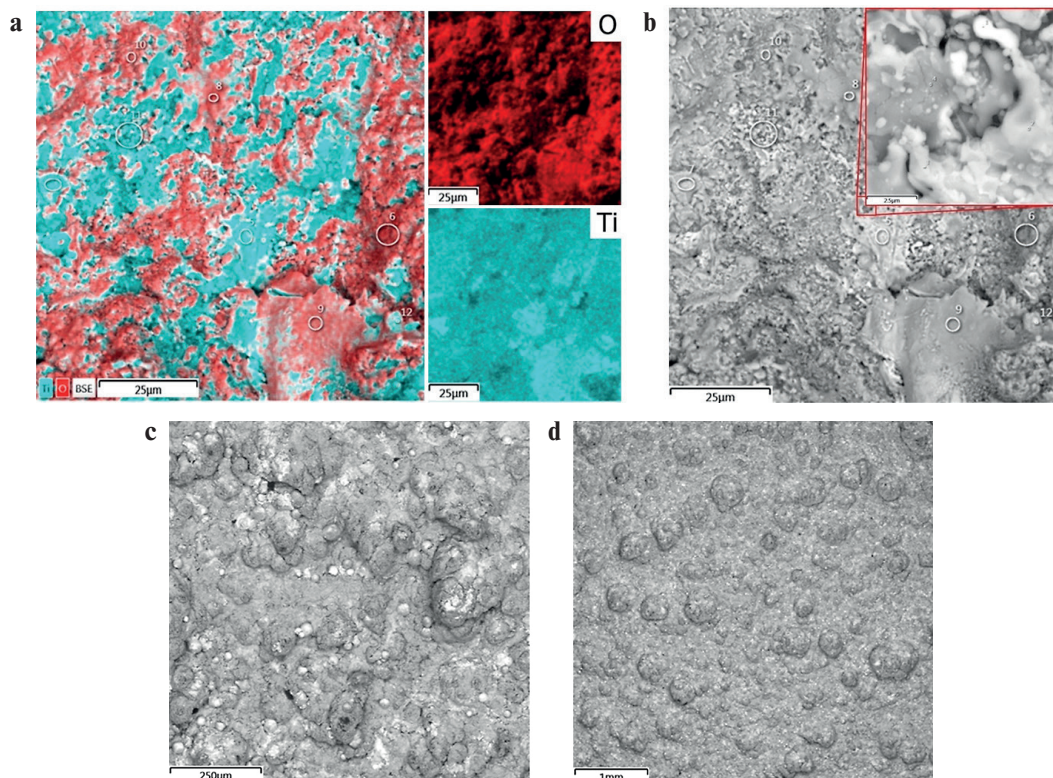


Fig. 3. EDS (a) and SEM images with visible field of 100  $\mu\text{m}$  (b), 1000  $\mu\text{m}$  (c), 5000  $\mu\text{m}$  (d) of coatings obtained with the speed of nozzle passage of 1500 mm/min, and the spray distance of 80 mm



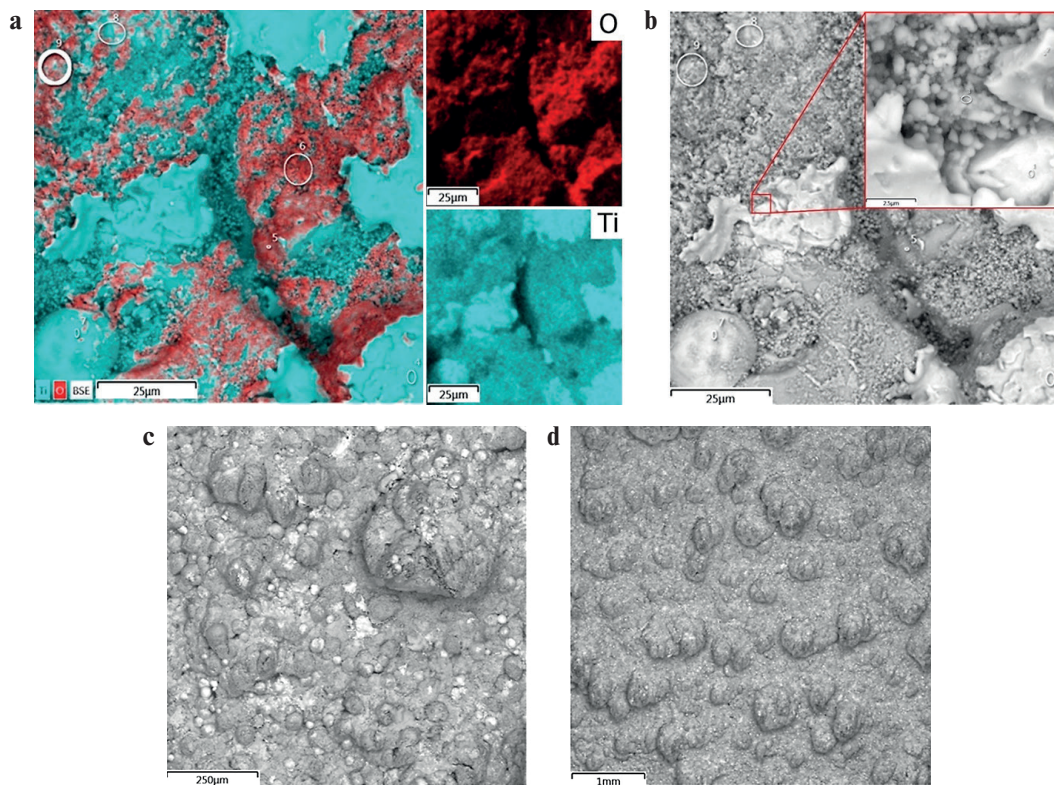


Fig. 4. EDS (a) and SEM images with visible field of 100  $\mu\text{m}$  (b), 1000  $\mu\text{m}$  (c), 5000  $\mu\text{m}$  (d) of coatings obtained with the speed of nozzle passage of 600 mm/min, and the spray distance of 60 mm

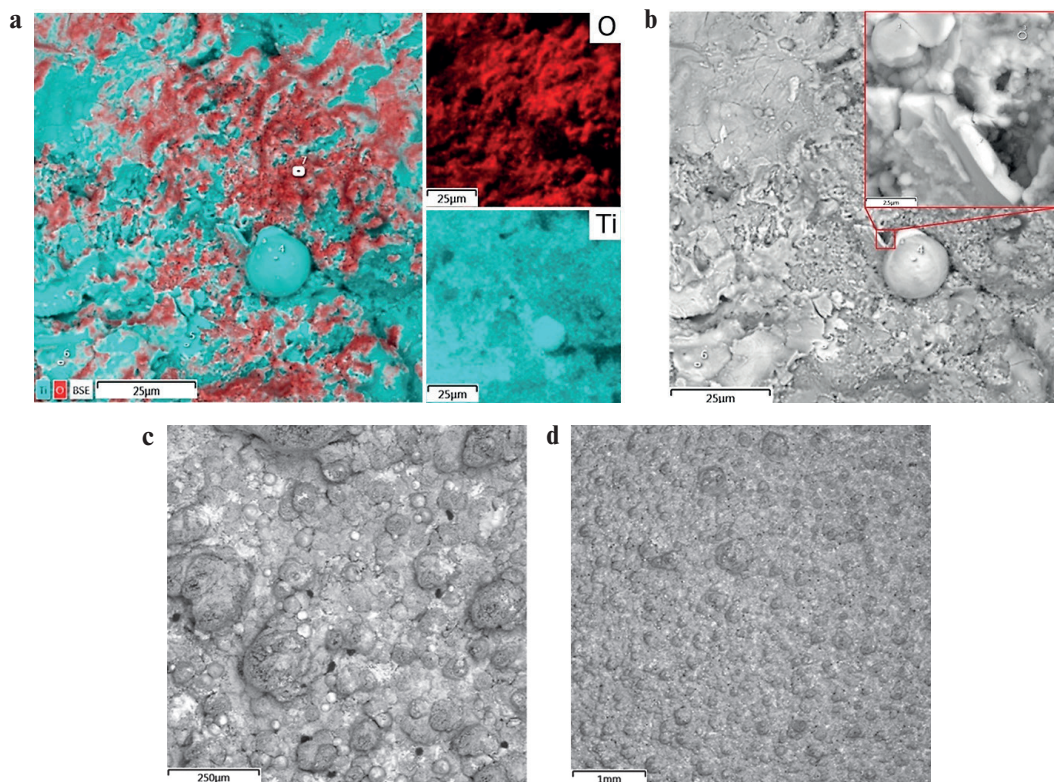


Fig. 5. EDS (a) and SEM images with visible field of 100  $\mu\text{m}$  (b), 1000  $\mu\text{m}$  (c), 5000  $\mu\text{m}$  (d) of coatings obtained with the speed of nozzle passage of 2000 mm/min, and the spray distance of 60 mm



gen increased by 3.8% (from 51.8 to 55.6%) when the speed of passage of the detonation nozzle increased from 600 to 2000 mm/min, at a constant deposition distance of 60 mm. Consequently, an increase in the speed of passage of the detonation nozzle by more than 3.3 times leads to a decrease in the average fraction of titanium and an increase in the average fraction of oxygen by approximately 4–5%.

Such conclusions suggest the existence of a linear dependence of the average fractions of titanium and oxygen in the resulting coatings on such technological spraying parameters as the spray distance and speed of the nozzle.

The results of X-ray diffraction (XRD) analysis of the coatings are presented in Figures 6 and 7. We take into account the main phase composition of formed coating:

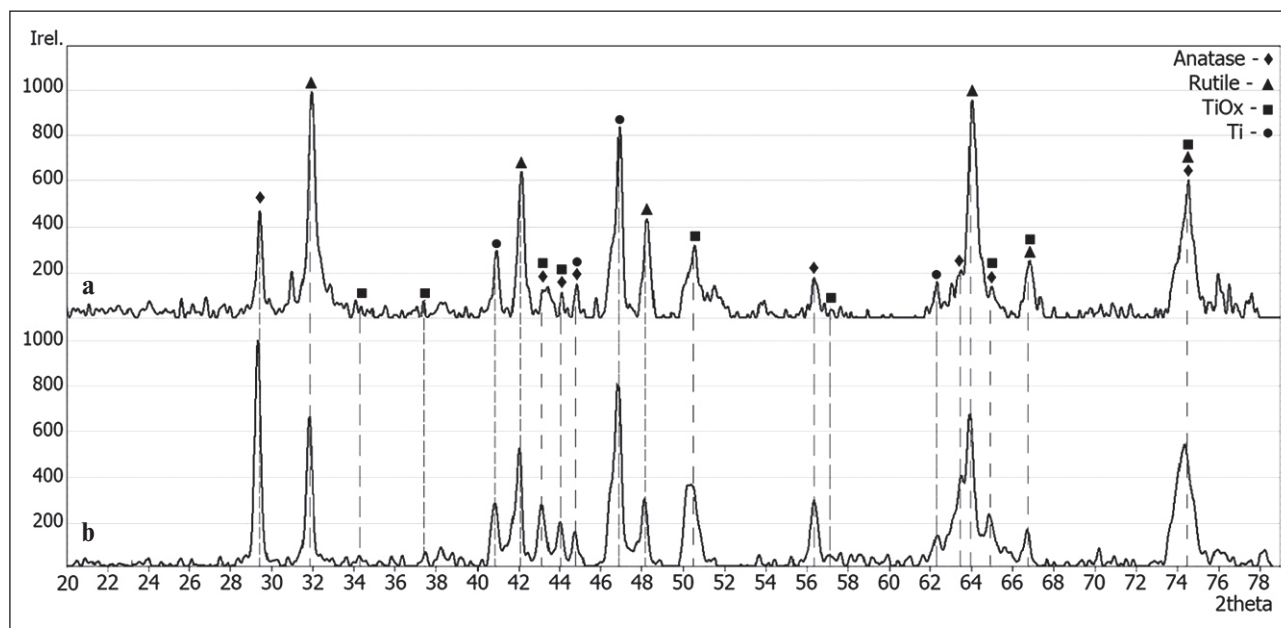


Fig. 6. XRD patterns (intensity, a.u., versus  $2\Theta$ , °) of coatings obtained with fixed speed of nozzle passage 1500, mm/min and different spray distance: a) 40 mm; b) 80 mm. Phase composition is presented in Table 2

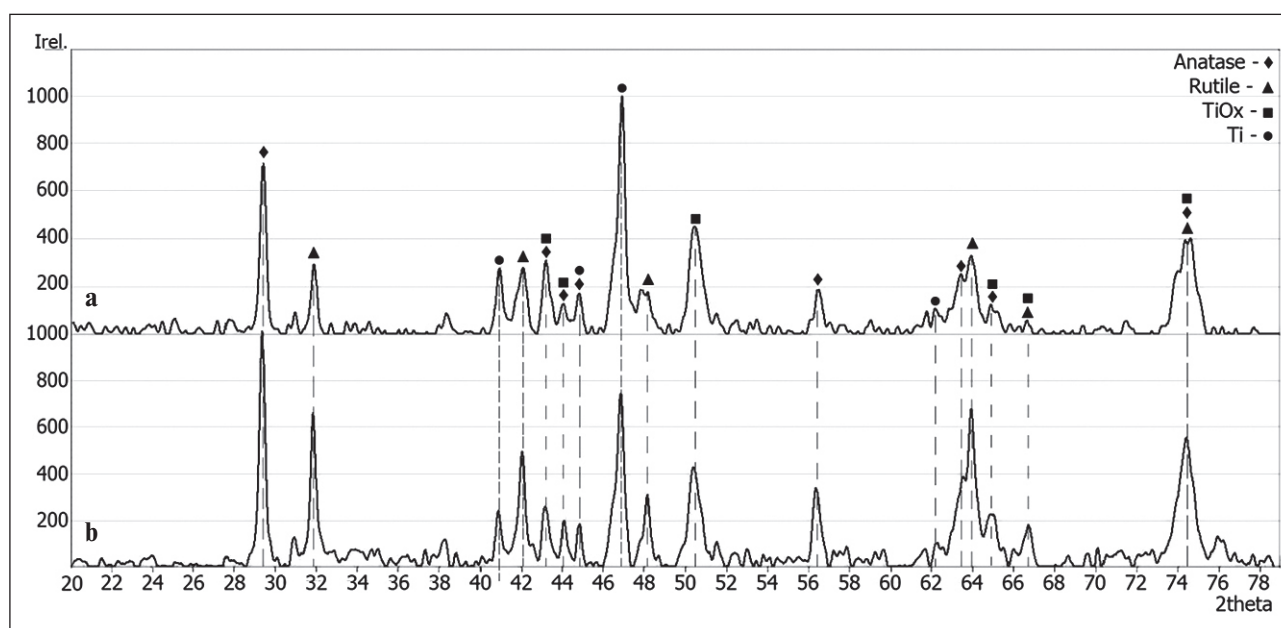


Fig. 7. XRD patterns (intensity, a.u., versus  $2\Theta$ , °) of coatings obtained with fixed spray distance 60 mm, and different values of speed of nozzle passage: a) 2000 mm/min; b) 600 mm/min. Phase composition is presented in Table 2



rutile ( $\text{TiO}_2$ ), anatase ( $\text{TiO}_2$ ), titanium oxide ( $\text{TiO}$ ), and titanium ( $\text{Ti}$ ) (see Table 2).

Figure 6 shows diffractograms of two coatings, which formed with fixed speed of nozzle passage 1500 m/min, and different spray distances 40 and 80 mm, respectively. Figure 3 shows diffractograms of two coatings, which formed with fixed spray distance 20, mm, and different values of speed of nozzle passage 600 and 2000 mm/min, respectively.

The results of XRD analysis of the coatings showed that the relative intensity of the peaks changes significantly the phase composition changes. This allows us to conclude that the phase composition of the coating changes depending on the detonation spray conditions. The fraction of rutile exceeds the fraction of anatase in the obtained samples except for the samples obtained with the fastest nozzle passage.

Table 3 shows the material characteristics of the allotropic species of titanium dioxide, in particular the lattice parameters of the unit cell, as well as the types and arrangements of atoms in the unit cell.

Figure 7 shows change in the phase composition of the coatings formed under different values of the spray distance and fixed the rest values of the spray process parameters (including fixed value of the speed of the nozzle passage 1500 mm/min). We focus below on change in the

rutile fraction due to its importance in the composition of photocatalytic titanium coatings [22, 23].

We find that the rutile fraction ( $Y_R$ , %) monotonically decreases from 44.97 to 30.87% with an increase in the spray distance ( $d$ , mm) from 40 to 80 mm. Three segments of this dependence can be distinguished. The rate of decrease in the rutile fraction is greatest at small spray distances (segment 1 in Figure 8). Then, a slowdown is observed in the middle of the dependence, when the rutile fraction decreases slightly (segment 2 in Figure 8). The decrease in the rutile fraction accelerates with a further increase in the spray distance (segment 3 in Figure 8).

We calculate the linear approximations of dependence of the phase fractions  $Y_w$  ( $w = R$  for rutile fraction,  $w = A$  for anatase fraction,  $w = O$  for titanium oxide fraction,  $w = T$  for titanium fraction) on the spray distance (mm):

$$Y_w(d) = k_w \cdot d + Y_{w0}, \quad (1)$$

where the values of parameter  $k_w$  and  $Y_{w0}$  of Eq. (1) are presented in Table 4. We plot Eq. (1) in Figure 8 (solid straight lines) for each phase fraction. Here  $k_w$  (%/mm) is the average rate of the  $w$ -phase fraction changing with the spray distance;  $Y_{w0}$  (%) is the conventional value of the  $w$ -phase fraction at zero spray distance.

Table 2

The phase compositions of coatings obtained in different spray regimes corresponding to the Figures 6 and 7

Phase compositions, %				Speed of nozzle passage, mm/min	Spraying distance, mm	Fig. no
Anatase	Rutile	TiO	Ti			
11.01	50.82	23.15	15.02	1500	40	6, a
29.69	33.25	18.43	18.62	1500	80	6, b
23.11	20.82	27.4	28.63	2000	60	7, a
28.25	33.93	19.78	18.04	600	60	7, b

Table 3

The material characteristics of the allotropic species of titanium dioxide

	Anatase	Rutile	Ti	TiO
COD number	96-900-8215	96-900-4142	96-900-8518	96-110-0043
Space group	I41/amd(#141-1)	P42/mnm(#136-1)	P63/mmc(#194-1)	A2/m(#12-4)
a, Å	3.78920	4.59300	2.95000	5.85500
b, Å	3.78920	4.59300	2.95000	9.34000
c, Å	9.53700	2.95900	4.68600	4.14200
Volume, Å <sup>3</sup>	136.9326	62.4220	35.3164	215.9890
$\alpha$ , °	90.0000	90.0000	90.0000	90.0000
$\beta$ , °	90.0000	90.0000	90.0000	90.0000
$\gamma$ , °	90.0000	90.0000	120.0000	107.5300



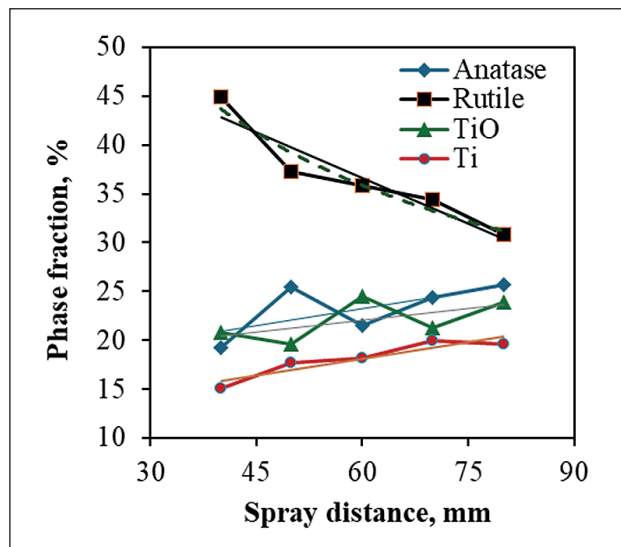


Fig. 8. Dependencies of the phase composition of the coatings formed under different values of the spray distance and fixed the rest values of the spray process parameters (including fixed value of the speed of the nozzle passage 1500 mm/min; see main text for details)

Dependence of the rutile fraction  $Y_R(d)$  allows obtaining that the average rate of the rutile fraction decreasing with the changing spray distance is about of 0.31 %/mm (coefficient of determination  $R^2 = 0.887$ ).

We observe that the anatase fraction does not change significantly. It slightly increases with an increase in the spray distance, within about of 5% from 19.21 to 25.65% (see Figure 8). The average rate of anatase fraction increasing with the changing spray distance is about of 0.118 %/mm ( $R^2 = 0.45$ ). The rest observed fraction show a similar trend. They are slightly increases with an increase in the spray distance too with average rates are about of 0.079 %/mm (TiO,  $R^2 = 0.36$ ), and 0.112 %/mm (Ti,  $R^2 = 0.85$ ). Thus, the growth of the remaining fractions is insignificant and amounts to about 5% with the same growth rate about of 0.1 %/mm.

It is interesting to note that the sum of the all average rates of the phase fraction changing is zero (see Table 4):  $k_R + k_A + k_O + k_T = 0$ . Therefore, we can write relationship between the average rates of the phase fraction changing as follows:  $|k_R| = k_A + k_O + k_T$ .

Table 4

The values of parameters  $k$  and  $Y_{w0}$  of Eq. (1)

Phase	w	$k_w$ , %/mm	$Y_{w0}$ , %	$R^2$
Rutile	R	—	55.31	0.887
Anatase	A	0.118	16.14	0.449
TiO	O	0.079	17.21	0.363
Ti	T	0.112	11.33	0.852

In addition, we note that the straight lines corresponding to the dependences of the titanium and titanium oxide fractions are almost parallel (see Figure 8), since  $k_O \approx k_T$ . This means that the increase in the fractions of titanium and titanium oxide is almost the same.

We find that the best fit of experimental data of rutile fraction dependence on the spray distance (markers in Figure 8) is given by the inverse power law  $Y_R(d) = 264.1/d^{0.28}$  (dash line in Figure 8) with the coefficient of determination  $R^2 = 0.94$ . This dependence approximates the experimental data better than the linear equation, for which  $R^2 = 0.887$  (see Table 4,  $w = R$ ).

In order to describe this equation, we suppose that the rate of rutile fraction decreasing  $Y'_R$  (the prime indicates the derivative of  $Y_R$  with respect to the spray distance  $d$ ) with the changing spray distance is proportional to  $Y_R$  and inverse proportional to the spray distance. Therefore, we can write following differential equation

$$Y'_R(d) = -b \frac{Y_R}{d}, \quad (2)$$

where  $b$  is the proportion coefficient.  
The solution to Eq. (1) is given by

$$Y_R(d) = \frac{a}{d^b}, \quad (3)$$

where  $a$  is the integration constant.

We indicated above found using least square method the values of  $a = 264.1 \text{ mm} \cdot \%$  and  $b = 0.48$ . The value of coefficient of determination is close to one ( $R^2 = 0.94$ ). This indicates that solution (3) of the formulated equation (2) is adequately described by experimental data. Thus, we propose the model of spray process sufficiently describing dependence of the rutile fraction with the changing spray distance.

Figure 9 shows change in the phase composition of the coatings formed under different values of the speed of nozzle passage and fixed the rest values of the spray process parameters (including fixed spray distance  $d = 60 \text{ mm}$ ).

We observe a nonmonotonic changing the rutile fraction with an increase in the speed of nozzle passage ( $s$ , mm/min). The maximum of rutile fraction is about 34.16% at  $s = 800 \text{ mm/min}$ .

Two main segments of the experimental dependence can be distinguished. The first segment is characterized



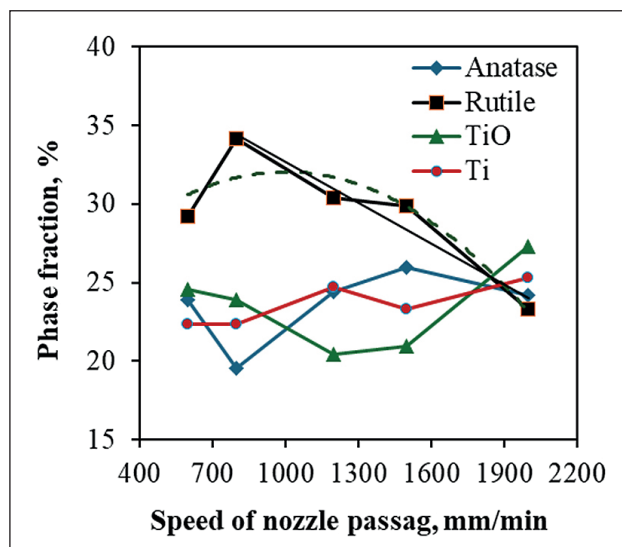


Fig. 9. Dependencies of the phase composition of the coatings formed under different values of the speed of the nozzle passage and fixed the rest values of the spray process parameters (including fixed value of the spray distance 60 mm; see main text for details)

by the growth of the rutile fraction to its maximum value at small values of  $s$  (segment 1 in Figure 9). Then, a decrease in the rutile fraction from the maximum to 23.29% is observed with a further increase in the speed of nozzle passage from 800 to 2000 (segment 2 in Figure 9).

The second segment can be sufficiently approximated by linear equation (solid straight line in Figure 9)  $Y_R(s) = 41.39 - 0.01 \cdot s$  ( $R^2 = 0.84$ ), from which we obtain that the average rate of rutile fraction decreasing is about of 0.01 %·min/m with the changing speed of nozzle passage from 800 to 2000 mm/min.

We find the parabolic equation (dash line in Figure 9)  $Y_R(s) = 23.08 + 0.017 \cdot s - 9 \cdot 10^{-6} \cdot s^2$  ( $R_2 = 0.84$ ), which can be used to fit of the experimental data (markers in Figure 9) over all range of the speed of nozzle passage varying.

In order to describe this parabolic equation, we suppose that the changing of rutile fraction occurs with negative constant acceleration  $Y''_R$  (two primes indicate the second order derivative of  $Y_R$  with respect to the speed of nozzle passage  $s$ ) with the changing spray distance. Therefore, we can write following second order differential equation

$$Y''_R(s) = -2A, \quad (4)$$

where  $A$  is the acceleration constant.

The solution to Eq. (4) is given by

$$Y_R = Y_m - A \cdot (s - s_m)^2, \quad (5)$$

where  $Y_m$  is the rutile fraction maximum at optimal value of the speed of nozzle passage  $s_m$ .

Using calculated above parabolic equation, we find the following values of parameters of Eq. (5):  $A = 9 \cdot 10^{-6} \% \cdot (\text{min/mm})^2$ ,  $Y_m = 34.19\%$ ,  $s_m = 1110 \text{ mm/min}$ . The theoretical values of the maximum of the rutile fraction and corresponding the speed of nozzle passage calculated using Eq. (5) are in satisfactory agreement with the experimentally observed values (34.16%,  $s_m = 800 \text{ mm/min}$ ). Thus, we propose the model of spray process sufficiently describing dependence of the rutile fraction with the changing speed of nozzle passage.

## CONCLUSION

We investigated experimentally the influence of the technology conditions of detonation spraying of coatings on its phase composition. We form the Ti–TiO<sub>2</sub> composite coating on hot-rolled carbon steel St3 substrate. We varied the spray distance and the speed of nozzle passage while the rest spraying parameters were fixed.

We found basing on obtained results of XRD analysis that the phase composition of the coating changes depending on the detonation spray conditions. We observed that the fraction of rutile exceeds the fraction of anatase in the obtained samples except for the samples obtained with the fastest nozzle passage. Results showed that changing the spray distance and speed nozzle passage did not significantly affect the anatase fraction.

We found that the rutile fraction monotonically decreases with an increase in the spray distance with fixed values of the rest parameters of spraying process. We obtained that the inverse power law fits of experimental dependence of the rutile fraction on the spray distance.

We observed a nonmonotonic changing the rutile fraction with an increase in the speed of nozzle passage and found its optimal values. We obtained that the parabolic equation fits of experimental dependence of the rutile fraction on the speed nozzle passage.

We proposed two new theoretical models of spray process based on differential equations, the solutions to which sufficiently describe dependencies of the rutile fraction on the spray distance and the speed of nozzle passage respectively. We showed that the theoretical values of the parameters calculated using the formulated equations are in satisfactory agreement with the experimentally observed values. We found relationship between the average rates of the phase fraction changing.

We believe that our results can be useful for optimization of detonation spray technology to obtain the Ti–TiO<sub>2</sub> based coatings with the given phase fractions of rutile and anatase necessary to ensure the required photocatalytic properties.



## REFERENCES

1. Ramaiah K., Bettahalli Eswaregowda N., Tambrallimath V., Kuppahalli P. Optimization of deposition parameters in plasma spray coatings. *Modeling and Optimization in Manufacturing*. 2021; 217–235.
2. Haridasan V., Velayudham A., Krishnamurthy R. Response surface modeling and parameter optimization of detonation spraying with enhanced coating performance. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46: 3474–3481.
3. Ulianitsky V., Rybin D., Sova A., Ostovari Moghaddam A., Samodurova M., Doubenskaia M., Trofimov E. Formation of metal composites by detonation spray of powder mixtures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021; 117 (1–2): 81–95.
4. Moghaddam A.O., Samodurova M., Mikhailov D., Trofimov E. High entropy intermetallic coatings fabricated by detonation spraying. *Materials Letters*. 2022; 311. Article number 131560.
5. Dudina D., Zlobin S., Bulina N., Bychkov A., Korolyuk V., Ulianitsky V., Lomovsky O. Detonation spraying of  $\text{TiO}_2$ –2.5vol.% Ag powders in a reducing atmosphere. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012; 32 (4): 815–821.
6. Sirota V.V., Savotchenko S.E., Strokova V.V., Vashchilin V.S., Podgornyi D.S., Prokhorenkov D.S., Zaitsev S.V., Kovaleva M.G. Effect of detonation spray regimes on photocatalytic activity of Ti– $\text{TiO}_2$  coatings. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2024; 452. Article number 115626.
7. Sirota V.V., Savotchenko S.E., Strokova V.V., Vashchilin V.S., Podgornyi D.S., Limarenko M.V., Kovaleva M.G. Effect of irradiation intensity on the rate of photocatalysis of  $\text{TiO}_2$  coatings obtained by detonation spraying. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024; 21(5): 3335–3345.
8. Tyurin Y., Kolisnichenko O., Jia J., Vasilik N., Kovaleva M., Prozorova M., Arseenko M., Sirota V. Performance and economic characteristics of multi-chamber detonation sprayer used in thermal spray technology. *International Thermal Spray Conference*. 2016; 83768: 630–634.
9. Sreekumar Rajesh T., Venkata Rao R. Experimental investigation and parameter optimization of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –40%  $\text{TiO}_2$  atmospheric plasma spray coating on SS316 steel substrate. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 5 (2): 5012–5020.
10. Kumar N., Choubey V. Comparative evaluation of oxidation resistance of detonation gun-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –40% $\text{TiO}_2$  coating on nickel-based superalloys at 800 °C and 900 °C. *High Temperature Corrosion of Materials*. 2023; 99 (5–6): 359–373.
11. Kantay N., Rakhadilov B., Kurbanbekov S., Yeskermessov D., Yerbolatova G., Apsezhanova A. Influence of detonation-spraying parameters on the phase composition and tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings. *Coatings*. 2021; 11 (7). Article number 793.
12. Xie L., Wang Y., Xiong X., Chen Z., Wang Y. Effects of oxygen fuel rate on microstructure and wear properties of detonation sprayed iron-based amorphous coatings. *Materials Transactions*. 2018; 59 (12): 1867–1871.
13. Forghani S., Ghazali M., Muchtar A., Daud A., Yusoff N., Azhari C. Effects of plasma spray parameters on  $\text{TiO}_2$ -coated mild steel using design of experiment (DoE) approach. *Ceramics International*. 2013; 39 (3): 3121–3127.
14. Astinchap B., Laelabadi K. Effects of substrate temperature and precursor amount on optical properties and microstructure of CVD deposited amorphous  $\text{TiO}_2$  thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019; 129: 217–226.
15. Astinchap B., Ghanbaripour H., Amuzgar R. Multifractal study of  $\text{TiO}_2$  thin films deposited by MO-CVD method: The role of precursor amount and substrate temperature. *Optik*. 2020; 222. Article number 165384.
16. Ulianitsky V., Dudina D., Batraev I., Kovalenko A., Bulina N., Bokhonov B. Detonation spraying of titanium and formation of coatings with spraying atmosphere-dependent phase composition. *Surface and Coatings Technology*. 2015; 261: 174–180.
17. Dey B., Bulou S., Gaulain T., Ravisy W., Richard-Plouet M., Goullet A., Granier A., Choquet P. Anatase  $\text{TiO}_2$  deposited at low temperature by pulsing an electron cyclotron wave resonance plasma source. *Scientific Reports*. 2020; 10 (1). Article number 21952.
18. Sirota V., Vashchilin V., Ogurtsova Y., Gubareva E., Podgornyi D., Kovaleva M. Structure and photocatalytic properties of the composite coating fabricated by detonation sprayed Ti powders. *Ceramics International*. 2024; 50 (1): 739–749.
19. Liu Y., Huang J., Feng X., Li H. Thermal-Sprayed photocatalytic coatings for biocidal applications: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021; 30 (1–2): 1–24.
20. Atacan K., Güy N., Özacar M. Recent advances in photocatalytic coatings for antimicrobial surfaces. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022; 36. Article number 100777.
21. Sirota V., Pavlenko V., Cherkashina N., Kovaleva M., Tyurin Y., Kolisnichenko O. Preparation of aluminum oxide coating on carbon/carbon composites using a new detonation sprayer. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021; 18 (2): 483–489.



22. Iesalnieks M., Eglitis R., Juhna T., Šmits K., Šutka A. Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> coatings obtained at room temperature on a polymethyl methacrylate substrate. International Journal of Molecular Sciences. 2022; 23 (21). Article number 12936.

23. Bersch J., Flores-Colen I., Masuero A., D. Dal Molin Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-based coatings for mortars on facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. Buildings. 2023; 13 (1). Article number 186.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vyacheslav V. Sirota** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director of the High Technology Center (HTC), Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Senior Researcher Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, zmas36@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4634-7109>

**Sergey E. Savotchenko** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, savotchenkose@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

**Valeria V. Stroková** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials, Head of the Department Materials Science and Technology of Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, vvstrokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

**Diana O. Bondarenko** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Assistant Professor, Department Materials Science and Technology of Materials, Senior Researcher Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, di\_bondarenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9708-2791>

**Daniil S. Podgorny** – Research Engineer, Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, dan\_podgor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7435-5005>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Vyacheslav V. Sirota** – development of the concept and development of the research methodology; analysis of the research results; drawing up the final conclusions.

**Sergey E. Savotchenko** – processing of experimental data using the methods of mathematical analysis; writing the original text of the article; drawing up the final conclusions.

**Valeria V. Stroková** – scientific supervision; analysis of the research results; drawing up the final conclusions.

**Diana O. Bondarenko** – literature review; graphical and tabular presentation of research results; analysis of research results.

**Daniil S. Podgorny** – description of microstructural images and EDS, conducting X-ray phase analysis and decoding diffraction patterns.

**The authors declare no conflict of interest.**

The article was submitted 03.09.2024; approved after reviewing 27.09.2024; accepted for publication 04.10.2024.



## Влияние технологических условий получения детонационных покрытий на их фазовый состав

Вячеслав Викторович Сирота<sup>1</sup> , Сергей Евгеньевич Савотченко<sup>1,2</sup> , Валерия Валерьевна Строкова<sup>1\*</sup> ,  
Диана Олеговна Бондаренко<sup>1</sup> , Даниил Сергеевич Подгорный<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, Белгород, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [vvstrokova@gmail.com](mailto:vvstrokova@gmail.com)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Детонационное напыление является эффективным методом нанесения высококачественных покрытий на различные материалы, широко применяемым в промышленности для повышения износостойкости и коррозионной стойкости поверхностей. В данной статье рассматривается влияние ключевых параметров процесса, таких как расстояние от пушки до подложки и скорость прохождения сопла, на структуру и свойства образуемых покрытий. **Материалы и методы исследования.** Исследованы покрытия Ti–TiO<sub>2</sub> на горячекатаной углеродистой стали. Варьируются дальность напыления и скорость прохода сопла при фиксированных остальных параметрах напыления. Проведены исследования полученных покрытий с использованием растровой электронной микроскопии, рентгенофазовой дифракции, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. **Результаты и обсуждения.** Установлено, что фазовый состав покрытия изменяется в зависимости от условий детонационного напыления. Доля рутила превышает долю анатаза в полученных образцах, за исключением образцов, полученных с наиболее быстрым проходом сопла. Доля рутила монотонно уменьшается с увеличением дальности напыления при фиксированных значениях остальных параметров процесса напыления. Обнаружено немонотонное изменение доли рутила с ростом скорости прохода сопла и найдены ее оптимальные значения. Предложены две новые теоретические модели процесса напыления на основе дифференциальных уравнений, решения которых достаточно полно описывают зависимости доли рутила от дальности напыления и скорости прохода сопла соответственно. **Заключение.** Показано, что теоретические значения параметров, рассчитанные с использованием сформулированных уравнений, удовлетворительно согласуются с экспериментально наблюдаемыми значениями.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Ti–TiO<sub>2</sub>, композиционные покрытия, процесс детонационного напыления, фазовый состав, анатаз, рутил, рентгеноструктурный анализ, расстояние напыления, скорость прохождения сопла

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Исследование проведено в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова и Совместного научного центра «Технологии и материалы» Белгородского национального исследовательского университета.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Сирота В.В., Савотченко С.Е., Строкова В.В., Бондаренко Д.О., Подгорный Д.С. Влияние технологических условий получения детонационных покрытий на их фазовый состав // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 404–414. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-404-414>. – EDN: LOONGJ.

### ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация технологических параметров нанесения покрытий с целью получения требуемых его характеристик является важной прикладной задачей [1]. Одним из широко используемых методов нанесения керамических покрытий является метод

детонационного напыления [2–4], в том числе на основе диоксида титана [5–7].

Детонационное напыление — это процесс, при котором покрытия формируются путем ускорения напыляемого порошка взрывной волной, образующейся при сгорании горючего газа с частотой от 1 до 100 раз в секунду. Горючий газ поступает



в ствол пушки, куда подается напыляемый порошок, порошок разгоняется и при попадании на подложку образует сплошное покрытие. Полученные этим методом покрытия характеризуются малой пористостью, высокой плотностью и адгезионной прочностью. При этом в качестве сырья могут использоваться минеральные (из силикатных, алюминатных и других горных пород), оксидные (в том числе синтетические) и металлические порошки. В качестве подложек могут использоваться различные металлы и сплавы, керамика, строительные материалы (на основе портландцемента и магнезильного цемента), стекло, различные пластики и полимерные стекла. Отдельно стоит отметить более высокую экономическую эффективность данного метода по сравнению с HVOF [8].

Ключевыми параметрами в процессе детонационного напыления, влияющими на характеристики получаемого покрытия, являются скорость прохождения сопла пистолета по подложке, дальность напыления, используемые горючие газы, морфология и теплофизические свойства исходного используемого порошка.

Многие авторы исследуют влияние различных параметров процесса детонационного напыления на свойства покрытий [9–11]. В частности, авторы [12] изучают влияние расхода топлива кислородом на микроструктуру детонационных напыляемых покрытий. Влияние параметров плазменного напыления на мягкую сталь с покрытием  $\text{TiO}_2$  описано в [13]. Влияние температуры подложки и количества прекурсора на свойства, в том числе микроструктуру тонких пленок  $\text{TiO}_2$ , описано в [14, 15].

Фазовый состав сформированных покрытий можно контролировать условиями процесса напыления [16]. Важной характеристикой является соотношение фаз анатаза и рутила для покрытий на основе диоксида титана [17].

В нашей недавней работе [18] композитные покрытия на основе оксидов титана были успешно получены методом детонационного напыления и исследованы их микроструктура, фазовый состав и фотокаталитическая активность. Покрытие на основе  $\text{Ti-TiO}_2$  является фотокаталитическим покрытием, которое включает в себя наноразмерные частицы, способные разлагать молекулы многих загрязняющих веществ за счет образования  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,

$\text{OH}^-$ , разлагая органические вещества на  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , убивая водоросли, грибки и бактерии под действием радиации, ультрафиолетового или видимого спектра [19, 20].

В данной работе мы исследуем влияние условий технологии детонационного напыления композитного покрытия  $\text{Ti-TiO}_2$  на металлическую подложку. Применяемая нами технология нанесения покрытий методом детонационного напыления позволяет легко варьировать такие параметры, как расстояние от сопла до поверхности (дистанция напыления) и скорость движения сопла. Нахождение оптимальных значений технологических параметров процесса детонационного напыления позволяет получать покрытия с заданными фазовыми долями рутила и анатаза, необходимыми для обеспечения требуемых фотокаталитических свойств.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве подложки для нанесения покрытия была выбрана горячекатаная углеродистая сталь Ст3 (ГОСТ 380-2005, Россия), поскольку металлопродукция из Ст3 занимает лидирующее место по объему всего потребляемого черного металла. Отметим, что по составу к стали Ст3 наиболее близка сталь марки А57036 (ASTM/ASME, США). Сравнение элементного состава этих сталей приведено в табл. 1.

Изготавливались образцы стали размером  $40 \times 40$  мм. Перед напылением поверхность мишени обезжиривалась и подвергалась пескоструйной обработке. Обработка образцов проводилась в воздушной среде. Покрытия формировались толщиной около 100–150 мкм.

Для напыления использовался порошок титана марки ПТС-1 (ОАО «Полема», Россия). Предварительно методом ситового просеивания отбиралась фракция 40–60 мкм. Результаты исследования гранулометрического состава титанового порошка марки ПТС-1 (интегральное (пунктирная линия) и дифференциальное (сплошная линия) распределения по размерам частиц) представлены на рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа титанового порошка приведены в предыдущей работе [18].

Формирование композиционного покрытия  $\text{Ti-TiO}_2$  осуществлялось с использованием роботизированного комплекса детонационного напыления

Таблица 1

Элементный состав сталей Ст3 и А57036

	Si	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	N	As	Fe
Ст3	0,15–0,3	0,14–0,22	0,4–0,65	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3	0,008	0,08	остаток
А57036	—	0,25	0,9	0,05	0,04	—	—	0,2	—	—	остаток



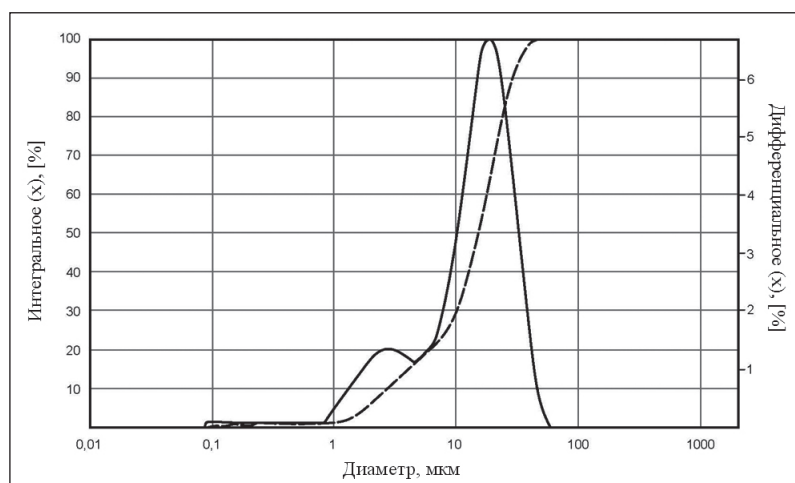


Рис. 1. Гранулометрический состав титанового порошка марки ПТС-1 (интегральное (пунктирная линия) и дифференциальное (сплошная линия) распределение размеров частиц)

покрытий (ООО «ИнтелМашин», г. Москва, Россия), оснащенного многокамерным детонационным ускорителем (МКУ) [21].

Фиксированные значения параметров нанесения покрытия роботизированным комплексом детонационного напыления покрытий следующие: длина ствола 300 мм, диаметр ствола 18 мм, скорость подачи порошка 300 г/ч. Расходы компонентов топливной смеси следующие: воздух – 1,37 м<sup>3</sup>/ч, кислород – 2,48 м<sup>3</sup>/ч, пропан (30 %) + бутан (70 %) – 0,59 м<sup>3</sup>/ч, (камера сгорания цилиндрической формы).

Расстояние напыления и скорость прохода сопла варьируются от 40 до 80 мм и от 600 до 2000 мм/мин соответственно. Напыляется по пять образцов при каждом условии. За результаты измерений принимаются средние значения 5 испытаний.

Контроль микроструктуры полученных покрытий осуществляется методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) с использованием Tescan MIRA3 LMU (Чехия).

Исследование фазового состава покрытия проводилось с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 (Thermo Fisher Scientific, Базель, Швейцария). Количественный анализ доли идентифицированных фаз в рентгенодифракционных исследованиях проводился методом Ритвельда с использованием программного обеспечения Siroquantv.3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существует несколько механизмов, характеризующих изменение доли фаз в зависимости от расстояния напыления и скорости осаждения в покрытиях. Прежде всего, с увеличением расстояния напыления уменьшается температура потока, который попадает на подложку. Также с увеличением расстояния напыления уменьшается кинетическая энергия частиц

порошка. Это снижает температуру при переходе кинетической энергии порошка в тепловую энергию.

Важна также скорость прохождения сопла пистолета. С увеличением скорости уменьшается время воздействия потока на поверхность подложки. В ходе этих процессов фазовые переходы  $Ti \rightarrow TiO_x$  происходят менее интенсивно или не происходят вообще из-за снижения температуры при формировании покрытия.

Результаты ЭДС и СЭМ анализа композитных покрытий  $Ti-TiO_x$  представлены на рис. 2–5. На снимках СЭМ с видимым полем 1000 и 5000 мкм (рис. 2–5, в, г) видна развитая поверхность, представленная в основном оксидами титана с шаровидными включениями титана размером 5–25 мкм. При увеличении до видимого поля 100 мкм (рис. 2–5, б) наблюдается равномерное распределение различных фаз ( $Ti-TiO_x$ ) с плавными переходами. При этом структура поверхности более развита, чем на макrofотграфиях, что обусловлено разлетом частиц титана при попадании их на поверхность.

Образующиеся «титановые брызги» имеют тенденцию усиливать окисление с образованием высших оксидов титана ( $TiO_2$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Ti_3O_5$ ...). При этом в местах удара часто видны пленки в виде металлического титана и его низших оксидов ( $Ti_6O$ ,  $Ti_3O$ ...), что видно по плавному изменению оттенков изображения между металлическим титаном и высшим оксидом ( $TiO_2$ ).

Этот факт подтверждают и ЭДС-снимки, представленные на рис. 2–5, а. На этих снимках видно хаотичное распределение как титана, так и кислорода. При этом на снимках визуальны различимы 3 основных оттенка, которые представлены металлическим титаном, диоксидами титана (анатаз, рутил, брукит) и переходной фазой  $TiO_x$ , где  $x = 0,7–1,3$ .

Результаты анализа СЭМ позволяют получить усредненный элементный состав покрытий из видимого поля 1000 мкм, напыленных при разных режимах.



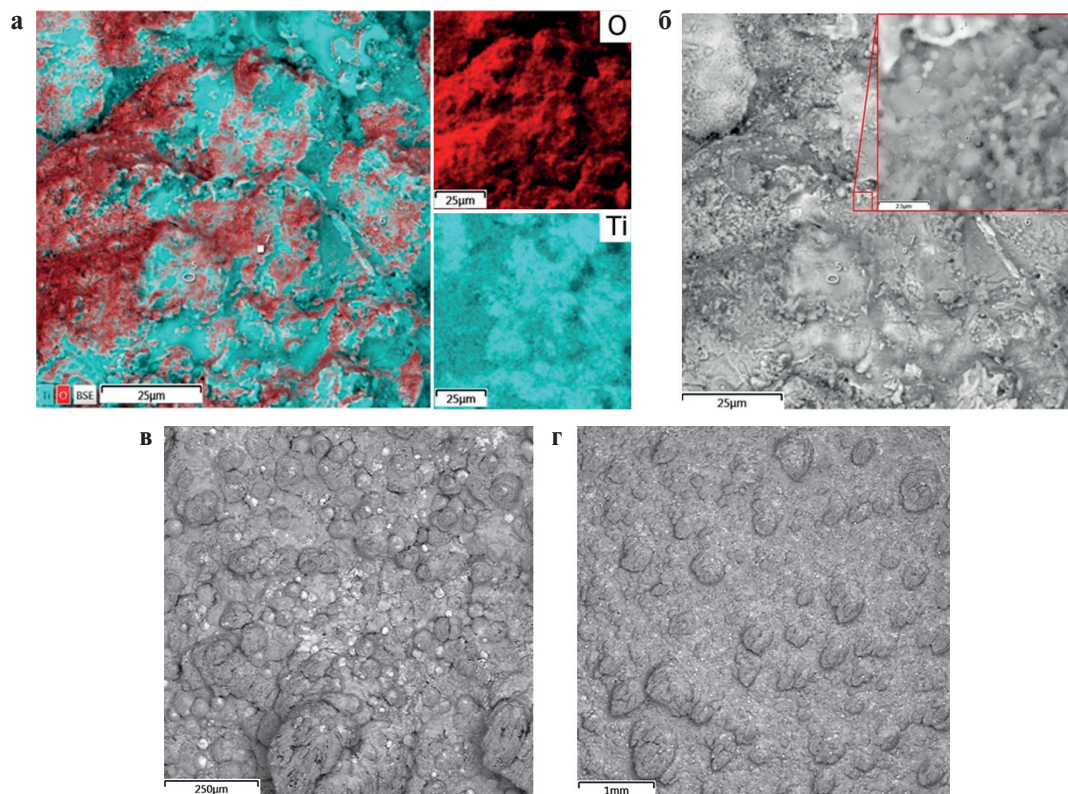


Рис. 2. ЭДС (а) и СЭМ-изображения с видимым полем 100 мкм (б), 1000 мкм (в), 5000 мкм (г) покрытий, полученных при скорости прохождения сопла 1500 мм/мин и дистанции напыления 40 мм

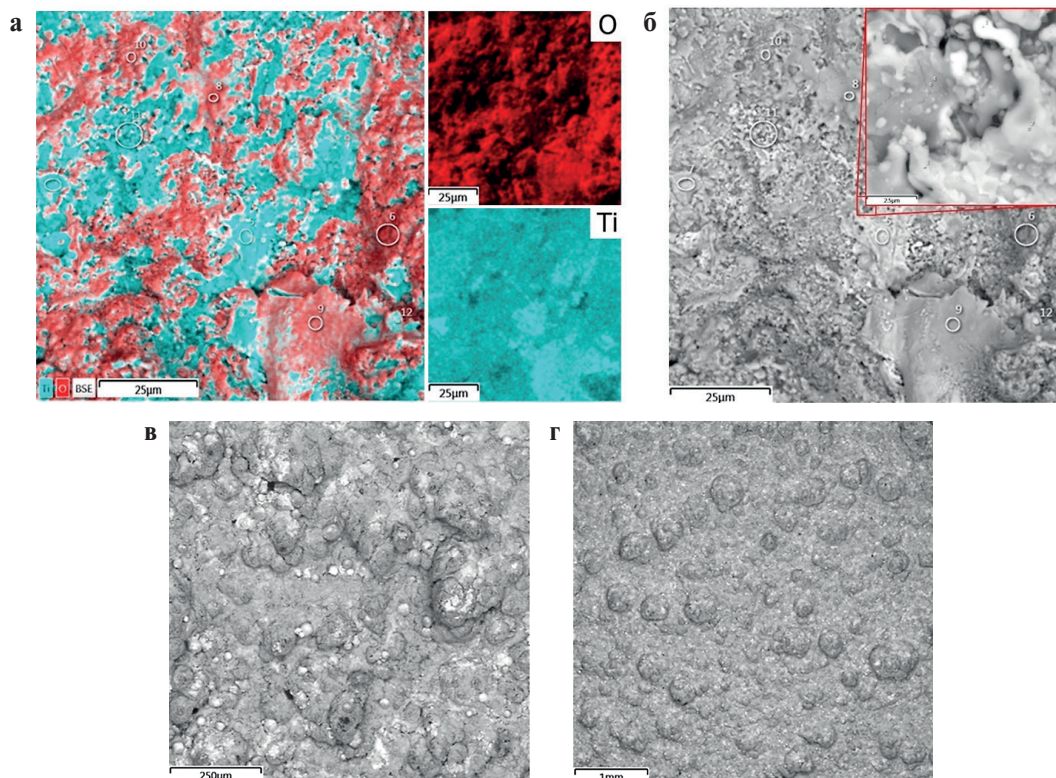


Рис. 3. ЭДС (а) и СЭМ-изображения с видимым полем 100 мкм (б), 1000 мкм (в), 5000 мкм (г) покрытий, полученных при скорости прохождения сопла 1500 мм/мин и дистанции напыления 80 мм



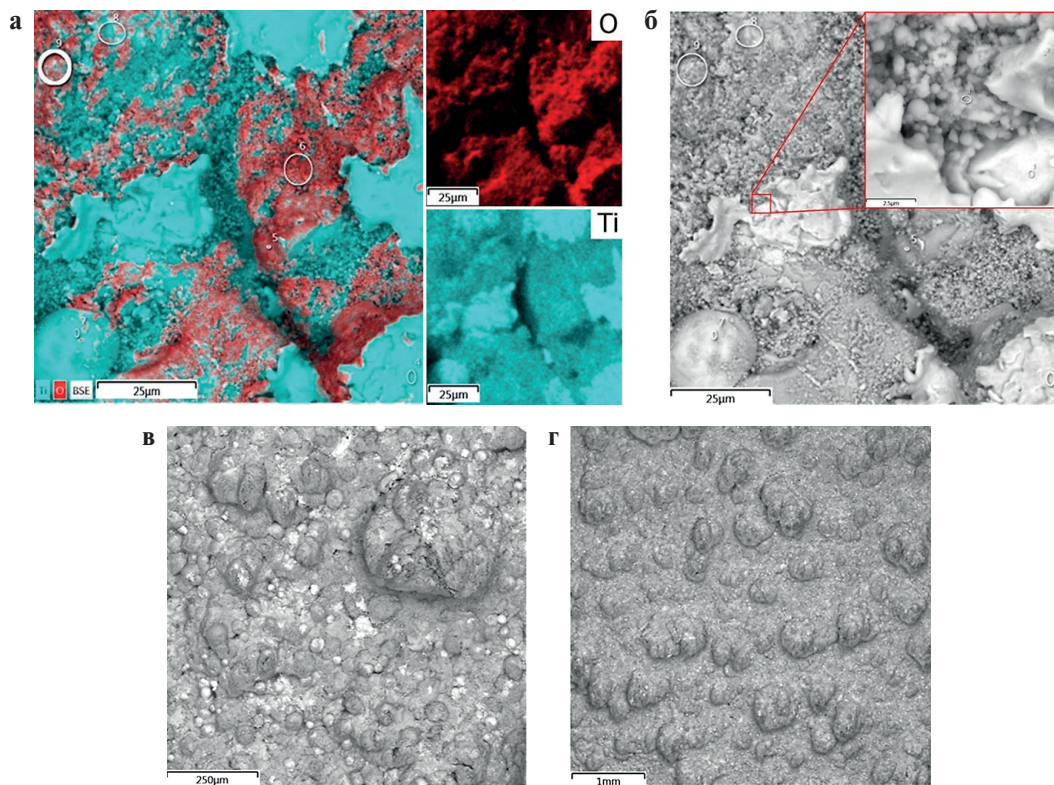


Рис. 4. ЭДС (а) и СЭМ-изображения с видимым полем 100 мкм (б), 1000 мкм (в), 5000 мкм (г) покрытий, полученных при скорости прохождения сопла 600 мм/мин и дистанции напыления 60 мм

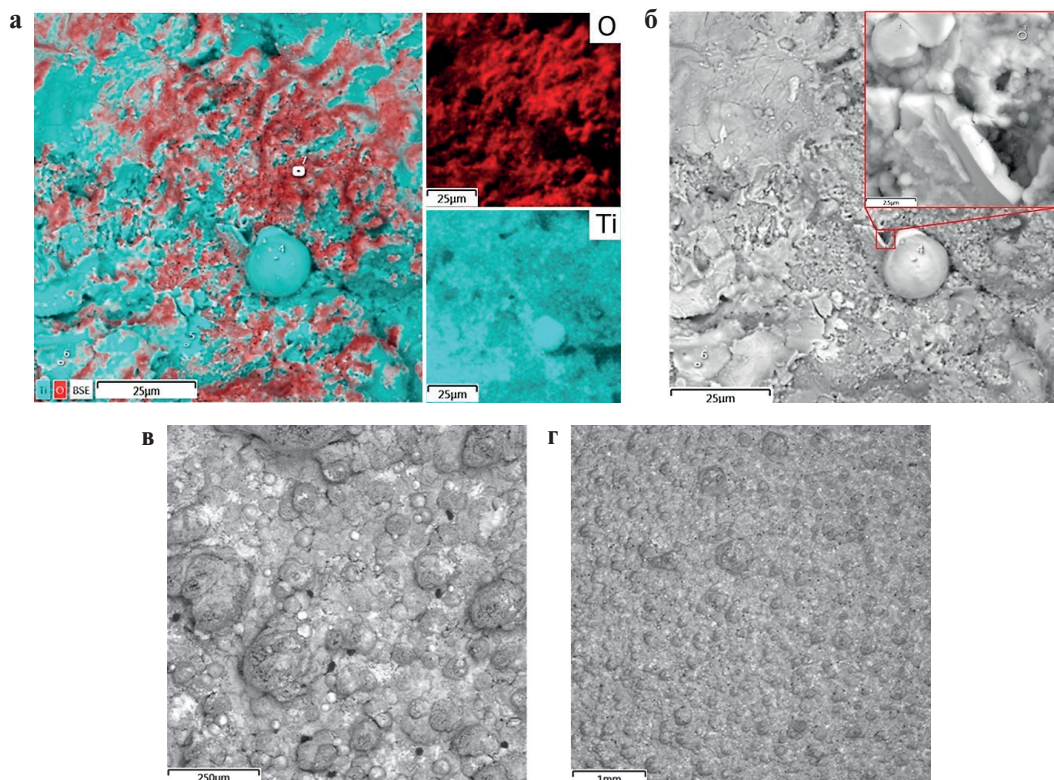


Рис. 5. ЭДС (а) и СЭМ-изображения с видимым полем 100 мкм (б), 1000 мкм (в), 5000 мкм (г) покрытий, полученных при скорости прохождения сопла 2000, мм/мин и дистанции напыления 60 мм



В частности, при увеличении расстояния напыления от 40 до 80 мм при постоянной скорости прохождения детонационного сопла 1500 мм/мин средняя доля титана увеличилась на 1,8% (с 39,3 до 37,5%), а средняя доля кислорода уменьшилась на 1,7% (с 62,3 до 60,6%). Следовательно, удвоение расстояния напыления приводит к увеличению средней доли титана примерно на 2% и уменьшению средней доли кислорода примерно на такую же величину.

Средняя доля титана снизилась на 4,7% (с 48,0 до 43,3%), а средняя доля кислорода увеличилась на 3,8% (с 51,8 до 55,6%) при увеличении скорости прохождения детонационного сопла с 600 до 2000 мм/мин при постоянной дистанции напыления 60 мм. Следовательно, увеличение скорости прохождения детонационного сопла более чем в 3,3 раза приводит к уменьшению средней доли титана и увеличению средней доли кислорода примерно на 4–5%.

Такие выводы позволяют предположить существование линейной зависимости средних долей титана и кислорода в получаемых покрытиях от таких технологических параметров напыления, как дистанция напыления и скорость движения сопла.

Результаты рентгенофазового анализа покрытий представлены на рис. 6 и 7. Учитывается основной фазовый состав сформированного покрытия: рутил ( $\text{TiO}_2$ ), анатаз ( $\text{TiO}_2$ ), оксид титана ( $\text{TiO}$ ) и титан ( $\text{Ti}$ ) (см. табл. 2).

На рис. 6 показаны дифрактограммы двух покрытий, сформированных при фиксированной скорости прохождения сопла 1500 м/мин и различных

расстояниях напыления 40 и 80 мм соответственно. На рис. 3 показаны дифрактограммы двух покрытий, сформированных при фиксированной скорости прохождения сопла 20 мм и различных значениях скорости прохождения сопла 600 и 2000 мм/мин соответственно.

Результаты рентгеноструктурного анализа покрытий показали, что относительная интенсивность пиков существенно меняется при изменении фазового состава. Это позволяет сделать вывод об изменении фазового состава покрытия в зависимости от условий детонационного напыления. Доля рутила превышает долю анатаза в полученных образцах, за исключением образцов, полученных при самом быстром прохождении сопла.

В табл. 3 приведены материальные характеристики аллотропных разновидностей диоксида титана, в частности параметры решетки элементарной ячейки, а также типы и расположение атомов в элементарной ячейке.

На рис. 7 показано изменение фазового состава покрытий, сформированных при различных значениях дистанции напыления и фиксированных остальных значениях параметров процесса напыления (включая фиксированное значение скорости движения сопла 1500 мм/мин). Далее сосредоточимся на изменении доли рутила в связи с ее важностью в составе фотокаталитических титановых покрытий [22, 23].

Мы обнаружили, что доля рутила ( $Y_R$ , %) монотонно уменьшается от 44,97 до 30,87% с увеличением дистанции напыления ( $d$ , мм) от 40 до 80 мм. Можно

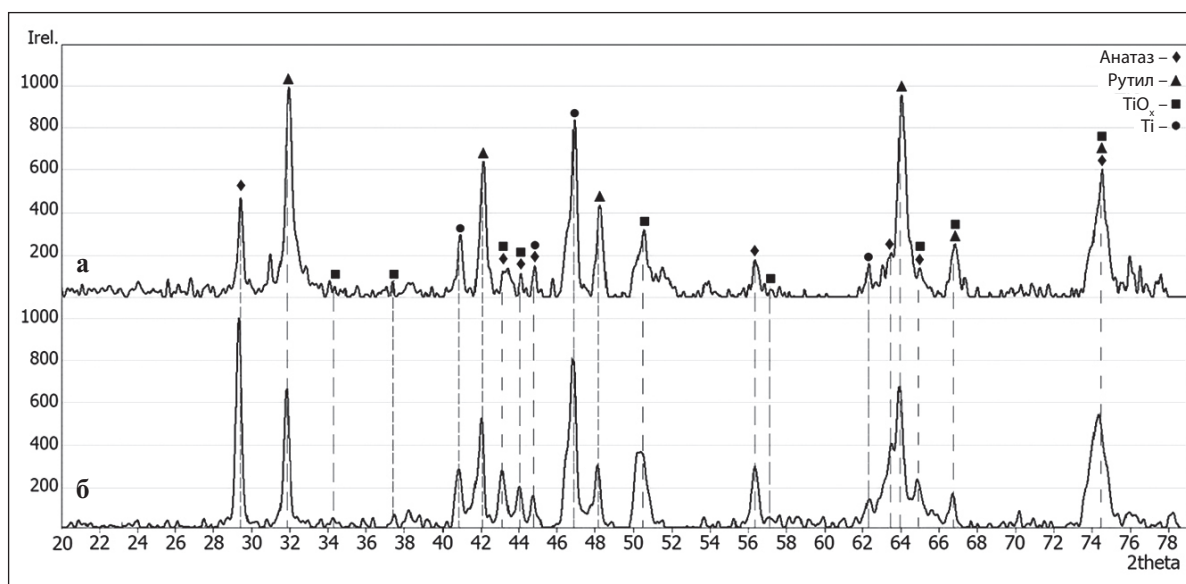


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы (интенсивность, отн. ед., в зависимости от  $2\theta$ , °) покрытий, полученных при фиксированной скорости движения сопла 1500 мм/мин и различной дистанции напыления: а) 40 мм; б) 80 мм. Фазовый состав представлен в табл. 2



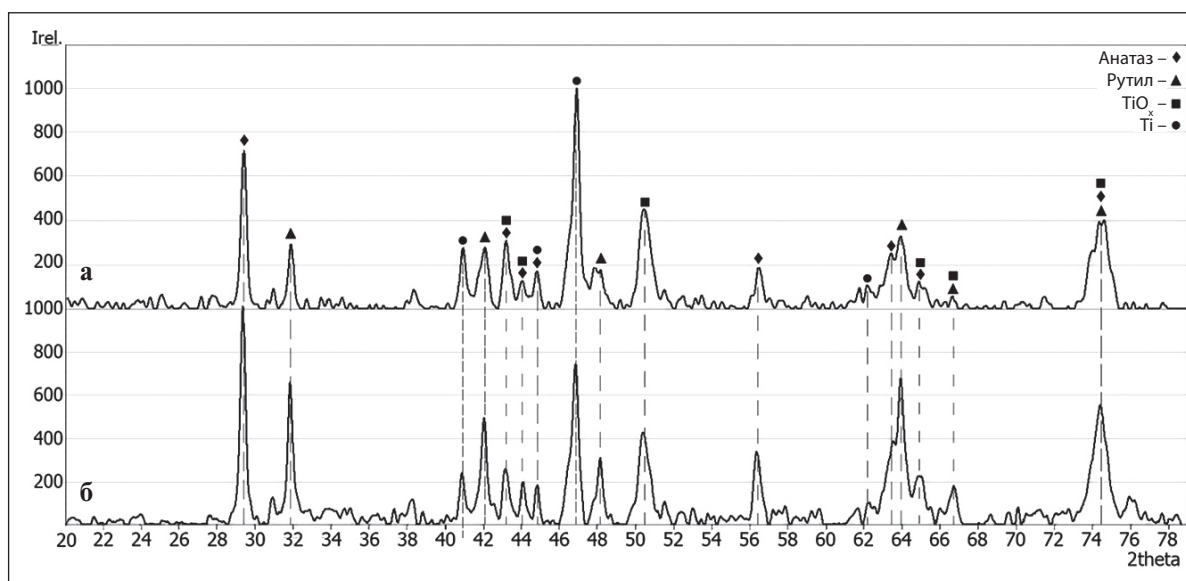


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы (интенсивность, отн. ед., в зависимости от  $2\theta$ , °) покрытий, полученных при фиксированном расстоянии напыления 60 мм и различных значениях скорости прохождения сопла: а) 2000 мм/мин; б) 600 мм/мин. Фазовый состав представлен в табл. 2

Таблица 2

Фазовые составы покрытий, полученных при различных режимах напыления, соответствующие рис. 2 и 3

Фазовый состав, %				Скорость прохождения сопла, мм/мин	Расстояние напыления, мм	Рис., №
Анализ	Рутит	TiO	Ti			
11,01	50,82	23,15	15,02	1500	40	6 а
29,69	33,25	18,43	18,62	1500	80	6 б
23,11	20,82	27,4	28,63	2000	60	7 а
28,25	33,93	19,78	18,04	600	60	7 б

Таблица 3

Характеристики решеток аллотропных модификаций диоксида титана

	Анализ	Рутит	Ti	TiO
№ COD	96-900-8215	96-900-4142	96-900-8518	96-110-0043
Пространственная группа	I41/amd(#141-1)	P42/mnm(#136-1)	P63/mmc(#194-1)	A2/m(#12-4)
a, Å	3,78920	4,59300	2,95000	5,85500
b, Å	3,78920	4,59300	2,95000	9,34000
c, Å	9,53700	2,95900	4,68600	4,14200
Объем, Å <sup>3</sup>	136,9326	62,4220	35,3164	215,9890
α, °	90,0000	90,0000	90,0000	90,0000
β, °	90,0000	90,0000	90,0000	90,0000
γ, °	90,0000	90,0000	120,0000	107,5300



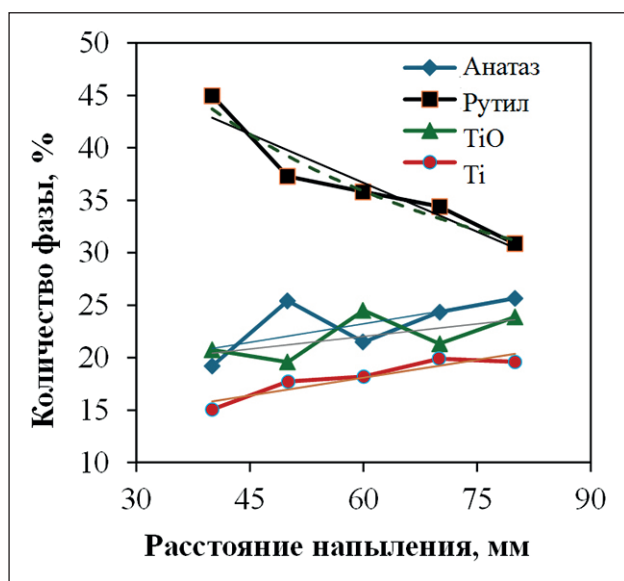


Рис. 8. Зависимости фазового состава покрытий, сформированных при различных значениях дистанции напыления и фиксированных остальных значениях параметров процесса напыления (включая фиксированное значение скорости движения сопла 1500 мм/мин; подробности см. в основном тексте)

выделить три участка этой зависимости. Скорость уменьшения доли рутила наибольшая при малых дистанциях напыления (участок 1 на рис. 8). Затем наблюдается замедление в середине зависимости, когда доля рутила несколько уменьшается (участок 2 на рис. 8). Уменьшение доли рутила ускоряется с дальнейшим увеличением расстояния напыления (участок 3 на рис. 8).

Рассчитываем линейные аппроксимации зависимости фазовых долей  $Y_w$  ( $w = R$  для фракции рутила,  $w = A$  для фракции анатаза,  $w = O$  для фракции оксида титана,  $w = T$  для фракции титана) от расстояния напыления (мм):

$$Y_w(d) = k_w \cdot d + Y_{w0}, \quad (1)$$

где значения параметра  $k_w$  и  $Y_{w0}$  уравнения (1) представлены в табл. 4. Построим уравнение (1) на рис. 8 (сплошные прямые линии) для каждой

фазовой доли. Здесь  $k_w$  (%/мм) — средняя скорость изменения доли  $w$ -фазы с расстоянием напыления;  $Y_{w0}$  (%) — условное значение доли  $w$ -фазы при нулевом расстоянии напыления.

Зависимость доли рутила  $Y_R(d)$  позволяет получить, что средняя скорость уменьшения доли рутила с изменением расстояния напыления составляет около 0,31, %/мм (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,887$ ).

Мы видим, что доля анатаза существенно не меняется. Она немного увеличивается с увеличением расстояния напыления, в пределах около 5% от 19,21 до 25,65% (см. рис. 8). Средняя скорость увеличения доли анатаза с изменением расстояния напыления составляет около 0,118 %/мм ( $R^2 = 0,45$ ). Остальные наблюдаемые доли показывают аналогичную тенденцию. Они также немного увеличиваются с увеличением расстояния напыления со средними скоростями около 0,079 %/мм ( $TiO$ ,  $R^2 = 0,36$ ) и 0,112 %/мм ( $Ti$ ,  $R^2 = 0,85$ ). Таким образом, рост остальных долей незначителен и составляет около 5% с той же скоростью роста около 0,1 %/мм.

Интересно отметить, что сумма всех средних скоростей изменения доли фазы равна нулю (см. табл. 4):  $k_R + k_A + k_O + k_T = 0$ . Поэтому можно записать зависимость между средними скоростями изменения доли фаз следующим образом:  $|k_R| = k_A + k_O + k_T$ .

Кроме того, отметим, что прямые, соответствующие зависимостям доли титана и оксида титана, практически параллельны (см. рис. 8), поскольку  $k_O \approx k_T$ . Это означает, что прирост доли титана и оксида титана практически одинаков.

Мы обнаружили, что наилучшее соответствие экспериментальным данным зависимости доли рутила от расстояния напыления (маркеры на рис. 8) дает обратная степенная зависимость  $Y_R(d) = 264,1/d^{0,28}$  (штриховая линия на рис. 8) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,94$ . Эта зависимость лучше аппроксимирует экспериментальные данные, чем линейное уравнение, для которого  $R^2 = 0,887$  (см. табл. 4,  $w = R$ ).

Для описания этого уравнения мы предполагаем, что скорость уменьшения доли рутила  $Y'_R$  (штрих указывает производную  $Y_R$  по расстоянию напы-

Таблица 4

Значения параметров  $k$  и  $Y_{w0}$  уравнения (1)

Фаза	w	$k_w$ , %/мм	$Y_{w0}$ , %	$R^2$
Рутил	R	-	55,31	0,887
Анатаз	A	0,118	16,14	0,449
TiO	O	0,079	17,21	0,363
Ti	T	0,112	11,33	0,852



ления  $d$ ) при изменении расстояния напыления пропорциональна  $Y_R$  и обратно пропорциональна расстоянию напыления. Поэтому можем записать следующее дифференциальное уравнение

$$Y'_R(d) = -b \frac{Y_R}{d}, \quad (2)$$

где  $b$  – коэффициент пропорции.  
Решение уравнения (1) имеет вид

$$Y_R(d) = \frac{a}{d^b}, \quad (3)$$

где  $a$  – константа интегрирования.

Выше мы указали найденные с помощью метода наименьших квадратов значения  $a = 264,1 \text{ мм} \cdot \%$  и  $b = 0,48$ . Значение коэффициента детерминации близко к единице ( $R^2 = 0,94$ ). Это говорит о том, что решение (3) сформулированного уравнения (2) адекватно описывается экспериментальными данными. Таким образом, мы предлагаем модель процесса напыления, в достаточной степени описывающую зависимость доли рутила при изменении расстояния напыления.

На рис. 9 показано изменение фазового состава покрытий, сформированных при различных значениях скорости прохождения сопла и фиксированных остальных значениях параметров процесса напыления (в том числе при фиксированной дистанции напыления  $d = 60 \text{ мм}$ ).

Наблюдается немонотонное изменение доли рутила с ростом скорости прохода сопла ( $s$ , мм/мин). Максимум доли рутила составляет около 34,16 % при  $s = 800 \text{ мм/мин}$ .

Можно выделить два основных участка экспериментальной зависимости. Первый участок характеризуется ростом доли рутила до максимального значения при малых значениях  $s$  (участок 1 на рис. 9). Затем наблюдается снижение доли рутила от максимума до 23,29% при дальнейшем увеличении скорости прохода сопла от 800 до 2000 (участок 2 на рис. 9).

Второй участок можно достаточно точно аппроксимировать линейным уравнением (сплошная прямая на рис. 9)  $Y_R(s) = 41,39 - 0,01 \cdot s$  ( $R^2 = 0,84$ ), из которого получаем, что средняя скорость уменьшения доли рутила составляет около 0,01, % · мин/м при изменении скорости прохода сопла от 800 до 2000 мм/мин.

Находим параболическое уравнение (штриховая линия на рис. 9)  $Y_R(s) = 23,08 + 0,017 \cdot s - 9 \cdot 10^{-6} \cdot s^2$  ( $R^2 = 0,84$ ), которое можно использовать для аппроксимации экспериментальных данных (маркеры на рис. 9) во всем диапазоне изменения скорости прохода сопла.

Для описания этого параболического уравнения предположим, что изменение доли рутила проис-

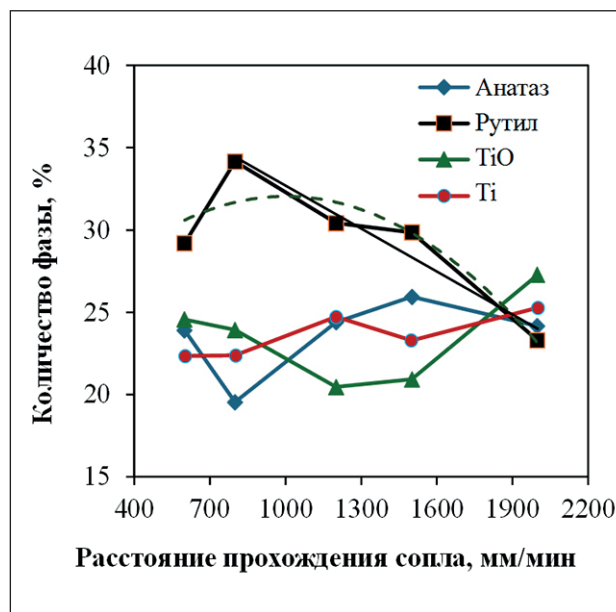


Рис. 9. Зависимости фазового состава покрытий, сформированных при различных значениях скорости прохода сопла и фиксированных остальных значениях параметров процесса напыления (включая фиксированное значение расстояния напыления 60 мм; подробности см. в основном тексте)

ходит с отрицательным постоянным ускорением  $Y''_R$  (два штриха указывают на производную второго порядка от  $Y_R$  по скорости прохода сопла  $s$ ) при изменении расстояния напыления. Поэтому можно записать следующее дифференциальное уравнение второго порядка

$$Y''_R(s) = -2A, \quad (4)$$

где  $A$  – константа ускорения.

Решение уравнения (4) имеет вид

$$Y_R = Y_m - A \cdot (s - s_m)^2, \quad (5)$$

где  $Y_m$  – максимум доли рутила при оптимальном значении скорости прохождения сопла  $s_m$ .

Используя рассчитанное выше параболическое уравнение, находим следующие значения параметров уравнения (5):  $A = 9 \cdot 10^{-6} \% \cdot (\text{мин/мм})^2$ ,  $Y_m = 34,19\%$ ,  $s_m = 1110 \text{ мм/мин}$ . Теоретические значения максимума доли рутила и соответствующие им скорости прохождения сопла, рассчитанные с использованием уравнения (5), удовлетворительно согласуются с экспериментально наблюдаемыми значениями (34,16%,  $s_m = 800 \text{ мм/мин}$ ). Таким образом, предложена модель процесса напыления, в достаточной степени описывающая зависимость доли рутила от изменения скорости прохода сопла.



## ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано влияние технологических условий детонационного напыления покрытий на его фазовый состав. Формировали композиционное покрытие Ti–TiO<sub>2</sub> на горячекатаной подложке из углеродистой стали Ст3. Изменяли дальность напыления и скорость прохода сопла, остальные параметры напыления фиксированы.

На основании полученных результатов рентгеноструктурного анализа установлено, что фазовый состав покрытия изменяется в зависимости от условий детонационного напыления. Замечено, что доля рутила превышает долю анатаза в полученных образцах, за исключением образцов, полученных с самым быстрым проходом сопла. Результаты показали, что изменение дальности напыления и скорости прохода сопла не оказывает существенного влияния на долю анатаза.

Обнаружили, что доля рутила монотонно уменьшается с увеличением расстояния напыления при фиксированных значениях остальных параметров процесса напыления. Получили, что обратный степенной закон соответствует экспе-

риментальной зависимости доли рутила от расстояния напыления.

Наблюдали немонотонное изменение доли рутила с ростом скорости прохождения сопла и нашли его оптимальные значения. Мы получили, что параболическое уравнение соответствует экспериментальной зависимости доли рутила от скорости прохождения сопла.

Мы предложили две новые теоретические модели процесса напыления на основе дифференциальных уравнений, решения которых достаточно хорошо описывают зависимости доли рутила от расстояния напыления и скорости прохождения сопла соответственно. Показали, что теоретические значения параметров, рассчитанные с использованием сформулированных уравнений, удовлетворительно согласуются с экспериментально наблюдаемыми значениями. Нашли взаимосвязь между средними скоростями изменения доли фаз.

Полагаем, что полученные результаты могут быть полезны для оптимизации технологии детонационного напыления с целью получения покрытий на основе Ti–TiO<sub>2</sub> с заданными фазовыми долями рутила и анатаза, необходимыми для обеспечения требуемых фотокаталитических свойств.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ramaiah K., Bettahalli Eswaregowda N., Tambrallimath V., Kuppahalli P. Optimization of deposition parameters in plasma spray coatings. *Modeling and Optimization in Manufacturing*. 2021; 217–235.
2. Haridasan V., Velayudham A., Krishnamurthy R. Response surface modeling and parameter optimization of detonation spraying with enhanced coating performance. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46: 3474–3481.
3. Ulianitsky V., Rybin D., Sova A., Ostovari Moghaddam A., Samodurova M., Doubenskaia M., Trofimov E. Formation of metal composites by detonation spray of powder mixtures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021; 117 (1–2): 81–95.
4. Moghaddam A.O., Samodurova M., Mikhailov D., Trofimov E. High entropy intermetallic coatings fabricated by detonation spraying. *Materials Letters*. 2022; 311. Article number 131560.
5. Dudina D., Zlobin S., Bulina N., Bychkov A., Korolyuk V., Ulianitsky V., Lomovsky O. Detonation spraying of TiO<sub>2</sub>–2.5vol.% Ag powders in a reducing atmosphere. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012; 32 (4): 815–821.
6. Sirota V.V., Savotchenko S.E., Strokova V.V., Vashchilin V.S., Podgornyi D.S., Prokhorenkov D.S., Zaitsev S.V., Kovaleva M.G. Effect of detonation spray regimes on photocatalytic activity of Ti–TiO<sub>2</sub> coatings. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2024; 452. Article number 115626.
7. Sirota V.V., Savotchenko S.E., Strokova V.V., Vashchilin V.S., Podgornyi D.S., Limarenko M.V., Kovaleva M.G. Effect of irradiation intensity on the rate of photocatalysis of TiO<sub>2</sub> coatings obtained by detonation spraying. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024; 21(5): 3335–3345.
8. Tyurin Y., Kolisnichenko O., Jia J., Vasilik N., Kovaleva M., Prozorova M., Arseenko M., Sirota V. Performance and economic characteristics of multi-chamber detonation sprayer used in thermal spray technology. *International Thermal Spray Conference*. 2016; 83768: 630–634.
9. Sreekumar Rajesh T., Venkata Rao R. Experimental investigation and parameter optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–40% TiO<sub>2</sub> atmospheric plasma spray coating on SS316 steel substrate. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 5 (2): 5012–5020.
10. Kumar N., Choubey V. Comparative evaluation of oxidation resistance of detonation gun-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–40%TiO<sub>2</sub> coating on nickel-based superalloys at 800 °C and 900 °C. *High Temperature Corrosion of Materials*. 2023; 99 (5–6): 359–373.
11. Kantay N., Rakhadilov B., Kurbanbekov S., Yeskermessov D., Yerbolatova G., Apsezhanova A. Influence of detonation-spraying parameters on the phase composition and tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings. *Coatings*. 2021; 11 (7). Article number 793.



12. Xie L., Wang Y., Xiong X., Chen Z., Wang Y. Effects of oxygen fuel rate on microstructure and wear properties of detonation sprayed iron-based amorphous coatings. *Materials Transactions*. 2018; 59 (12): 1867–1871.
13. Forghani S., Ghazali M., Muchtar A., Daud A., Yusoff N., Azhari C. Effects of plasma spray parameters on TiO<sub>2</sub>-coated mild steel using design of experiment (DoE) approach. *Ceramics International*. 2013; 39 (3): 3121–3127.
14. Astinchap B., Laelabadi K. Effects of substrate temperature and precursor amount on optical properties and microstructure of CVD deposited amorphous TiO<sub>2</sub> thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019; 129: 217–226.
15. Astinchap B., Ghanbaripour H., Amuzgar R. Multifractal study of TiO<sub>2</sub> thin films deposited by MO-CVD method: The role of precursor amount and substrate temperature. *Optik*. 2020; 222. Article number 165384.
16. Ulianitsky V., Dudina D., Batraev I., Kovalenko A., Bulina N., Bokhonov B. Detonation spraying of titanium and formation of coatings with spraying atmosphere-dependent phase composition. *Surface and Coatings Technology*. 2015; 261: 174–180.
17. Dey B., Bulou S., Gaulain T., Ravisy W., Richard-Plouet M., Goullet A., Granier A., Choquet P. Anatase TiO<sub>2</sub> deposited at low temperature by pulsing an electron cyclotron wave resonance plasma source. *Scientific Reports*. 2020; 10 (1). Article number 21952.
18. Sirota V., Vashchilin V., Ogurtsova Y., Gubareva E., Podgornyi D., Kovaleva M. Structure and photocatalytic properties of the composite coating fabricated by detonation sprayed Ti powders. *Ceramics International*. 2024; 50 (1): 739–749.
19. Liu Y., Huang J., Feng X., Li H. Thermal-Sprayed photocatalytic coatings for biocidal applications: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021; 30 (1–2): 1–24.
20. Atacan K., Güy N., Özacar M. Recent advances in photocatalytic coatings for antimicrobial surfaces. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022; 36. Article number 100777.
21. Sirota V., Pavlenko V., Cherkashina N., Kovaleva M., Tyurin Y., Kolisnichenko O. Preparation of aluminum oxide coating on carbon/carbon composites using a new detonation sprayer. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021; 18 (2): 483–489.
22. Iesalnieks M., Eglītis R., Juhna T., Šmits K., Šutka A. Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> coatings obtained at room temperature on a polymethyl methacrylate substrate. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23 (21). Article number 12936.
23. Bersch J., Flores-Colen I., Masuero A., D. Dal Molin Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-based coatings for mortars on facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. *Buildings*. 2023; 13 (1). Article number 186.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сирота Вячеслав Викторович** – кандидат физико-математических наук, директор Центра высоких технологий (ЦВТ) БГТУ им. В.Г. Шухова, старший научный сотрудник Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, zmas36@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4634-7109>

**Савотченко Сергей Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, профессор кафедры высшей математики и физики, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия, savotchenkose@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

**Строкова Валерия Валерьевна** – доктор технических наук, профессор РАН, директор Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, vvstrokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

**Бондаренко Диана Олеговна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, старший научный сотрудник Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, di\_bondarenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9708-2791>

**Подгорный Даниил Сергеевич** – инженер-исследователь Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, dan\_podgor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7435-5005>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Сирота В.В.** – разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; составление итоговых выводов.

**Савотченко С.Е.** – обработка экспериментальных данных с применением методов математического анализа; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

**Строкова В.В.** – научное руководство; анализ результатов исследования; составление итоговых выводов.

**Бондаренко Д.О.** – литературный обзор; графическое и табличное представление результатов исследования; анализ результатов исследования.

**Подгорный Д.С.** – описание микроструктурных снимков и ЭДС, проведение рентгенофазового анализа и расшифровка дифрактограмм.

## Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 27.09.2024; принята к публикации 04.10.2024.



## Effect of adhesion additive and nature of filler on interfacial interaction and fatigue parameters of asphalt mastic

Vikroria N. Gorbatova , Irina V. Gordeeva , Tatiana V. Dudareva\* , Irina A. Krasotkina 

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\* Corresponding author: e-mail: yanadva@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** The effect of adhesion additive and nature of filler on fatigue life and interfacial interaction in mastic is analyzed in this paper. **Materials and methods of research.** Frequency sweep from 0.1 to 100 rad/s at strain 0.05% at temperatures from 30 to –10°C with a step 10°C and cyclic tests (LAS test) at temperatures from 16 to 1°C with a step 3°C for bitumen grade BND 100/130 and mastics based on it, containing fillers of different nature, were performed on the dynamic shear rheometer. Mastics were prepared by mixing bitumen (3 min; 160°C and 600 rpm) and filler (filler volume fraction – 0.275). Adhesion additive in an amount of 0.7%, was introduced into bitumen before the filler to investigate the effect of AD on the properties of bitumen and AB. The damage characteristic curve under cyclic loads was calculated using two models of VECD theory (Viscoelastic Continuum Damage Modeling System): dissipated strain energy and pseudo-strain energy. **Results and Discussion.** The influence of nature and properties of filler, adhesive additive, temperature and frequency of tests on the parameter of interfacial interaction  $K-B-G^*$  and thickness of adsorbed layer has been investigated. The intensity of damage in the specimen under cyclic loads and the behavior of fatigue parameters as a function of test temperature at two variants of determining the parameter  $\alpha$  have been analyzed. **Conclusion.** It is shown that an increase in the interfacial layer thickness in asphalt mastic leads to an increase in their resistance to damage accumulation (Damage Intensity) during fatigue testing (LAS), and lowers the rate of pseudo-deformation energy growth.

**KEYWORDS:** mastic, filler, interfacial interaction, adsorbed layer thickness, fatigue parameters

**ACKNOWLEDGMENTS:** This work was performed within the framework of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS, Theme № 122040400099-5).

### FOR CITATION:

Gorbatova V. N., Gordeeva I. V., Dudareva T. V., Krasotkina I. A. Effect of adhesion additive and nature of filler on interfacial interaction and fatigue parameters of asphalt mastic. *Nanotechnologies in construction*. 2024; 16(5): 415–430. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-415-430>. – EDN: KQNYDX.

### INTRODUCTION

The interfacial interaction between bitumen and stone materials of asphalt mix (crushed stone of different fractions, sand, and fine filler) largely determines the performance and service life of the pavement. In the process of asphalt mix preparation the selective adsorption of bitumen components occurs immediately after the surface wetting of stone materials. The activity of adsorption is controlled by the nature, dispersity and specific surface area of stone materials, chemical composition of bitumen, and surfactants widely used to improve adhesion and the adsorbed bitumen composi-

tion is characterized by an increased concentration of the most high molecular weight and polar components compared to volume bitumen [1].

For many decades, the attention of researchers has been targeted to develop effective methods for evaluating the adhesion of bitumen with stone materials [2]. In recent years, the relationship between interfacial interaction and rheological properties of mastics consisting of a matrix phase of bitumen and finely dispersed filler is actively studied [3–6].

Using the Palierne emulsion model [7], that had been developed for a system of solid particles dispersed in a viscoelastic a matrix, the physicochemical interaction



between filler and bitumen can be characterized by the interfacial interaction parameter  $K-B-G^*$  through the complex modules of the constituent components:

$$K-B-G^* = \frac{(G_c^*/G_m^*)-1}{(1.5+G_c^*/G_m^*)\times\varphi}, \quad (1)$$

where  $\varphi$  – filler volume fraction;  $G_c^*$  and  $G_m^*$  – values of complex modulus for mastic and matrix (bitumen binder) depending on frequency.

One of the main types of pavement failure is the formation of fatigue cracks at so-called average operating temperatures. The content of mastic in asphalt mixes is only about 10–15%, but mastic is component that can break down first and have a direct effect on the fatigue life of the pavement under cyclic loadings.

The linear amplitude sweep (LAS) test [8–9] by means of a dynamic shear rheometer is widely used to evaluate the fatigue properties of bitumen binder and mastic. In the first stage of the test, the viscoelastic characteristics of the specimen are determined from the frequency sweep results in the LVE range region. At the second stage, when the specimen is subjected to a series of oscillatory load cycles with increasing strain amplitude, the accumulated damage intensity is determined. This provides an ability to determine the fatigue characteristics that are close to the real deformation conditions of bitumen binder or mastic during the operation of pavements [10].

Fatigue properties are analyzed in accordance with the VECD theory (Viscoelastic continuum damage modeling system), based on the Schapery potential theory [11], where the intensity of damage accumulation ( $D$ ) depends on the potential energy ( $W$ ), which is related to the damage intensity and the parameter  $\alpha$  defining by the ability of a given material to accumulate damage:

$$dD/dt = -(\partial W/\partial D)^\alpha. \quad (2)$$

The main element of this theory is the construction of the dependence linking the damage intensity with the function characterizing the integrity of the material under cyclic loading. The damage intensity at a certain failure level, determined by the selected failure criterion, is used in the definition of the coefficient  $A$  in the fatigue law to determine the fatigue parameter  $N_f$ :

$$N_f = A \times (\gamma_{max})^{-B}, \quad (3)$$

where  $N_f$  is the number of cycles to failure,  $B = 2\alpha$  – characterizes the undamaged state of the material, it is determined on the basis of experimental data of LAS test in its first part at minimum deformation, and  $\gamma_{max}$  is the maximum deformation at a given pavement design, which is usually taken as 2.5, 5 or 15% [12].

The damage intensity is designed using various VECD theory models based on the energy that determines the

damage intensity [13–16]. The latest AASHTO T391-20 [12] standard adopts a model based on dissipated strain energy, where the loss modulus is used as a function characterizing the material integrity:

$$W = \pi I_D \gamma_i^2 (G_i^* \sin \delta_i), \quad (4)$$

and the damage intensity from test time is determined by the formula (5):

$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi I_D \gamma_i^2 (G_i^* \sin \delta_i - G_{i-1}^* \sin \delta_{i-1})] \frac{\alpha}{1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (5)$$

where  $I_D$  is the value of complex modulus  $G^*$  at strain of 1%;  $\gamma_i$ ,  $G_i^*$ ,  $\delta_i$  and  $t_i$  – current values of strain, complex modulus, phase angle and time in the linear amplitude sweep test (second part of LAS test).

The second, widely used calculation model is based on pseudo-strain energy, and pseudo-stiffness is used as a function of material integrity under cyclic loading [17–18]:

$$W^R = \frac{1}{2} C \gamma_R^2, \quad (6)$$

where  $\gamma_R$  is pseudo-deformation,  $C$  – material integrity defined as pseudo-stiffness by formula (7):

$$C(t) = \frac{|G_i^*|(t)}{|G^*|_{in}}, \quad (7)$$

where  $|G^*|_{in}$  and  $|G^*|(t)$  – initial (determined at the second point) and current values of the complex modulus obtained in the second part of the LAS test.

The intensity of damage accumulation in this case:

$$D(t) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{DMR}{2} (\gamma_p^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right] \frac{\alpha}{1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (8)$$

$$\gamma_p^R = \gamma_p \cdot |G^*|_{LVE}, \quad (9),$$

$$C = \frac{\tau_p}{\gamma_p^R \cdot DMR}, \quad (10)$$

where  $\gamma_p^R$  is the pseudo-strain at  $\tau_p$ ,  $\alpha$  – parameter characterizing the undisturbed state of the sample (the first part of the LAS test);  $\tau_p$  – the strain determined at  $\tau_p$  on the curve  $\tau(\gamma)$  in each load cycle, and DMR is defined as:

$$DMR = \frac{|G^*|_{in}}{|G^*|_{LVE}}, \quad (11)$$



where  $|G^*|_{LVE}$  – the value of the complex modulus determined in the frequency sweep test (the first part of the LAS test).

To determine the parameter  $B$ , the slope of the dependence of the logarithm of the relaxation modulus on time ( $m$ ) is used. There are difficulties in determining the relaxation modulus, therefore the relaxation modulus is usually obtained by transformation methods or, simplifying, by plotting the dependence of the complex modulus or storage modulus ( $G'$ ) on frequency. Note that the dependence of  $B$  on the slope angle ( $m$ ) is left open. For asphalt concrete,  $B = 2\alpha$  is usually taken, with  $\alpha = 1/m$ , whereas for binders, both this formula and the formula  $\alpha = 1/(1+m)$  are used [12, 19].

The goal of this work is to investigate the effect of adhesive additive and the nature of mineral filler on the interfacial interaction in asphalt mastic based on road bitumen BND 100/130 and to evaluate the influence of the thickness of the adsorbed layer of bitumen on the fatigue life of mastic.

## MATERIALS AND METHODS

### Materials

The work has been used:

- Oil road bitumen of BND 100/130 grade according to GOST 33133 [20]: penetration at 25°C – 115 dmm; softening point on the Ring and Ball – 46°C; Fraas breaking point – minus 23°C. The group chemical composition of bitumen determined by liquid adsorption chromatography with gradient displacement [21] is presented in Figure 1.

- Fillers:

- mineral powder of carbonate rocks of MP-1 grade according to GOST R 52129-2003 [22] (H1);

- powder obtained by mechanical crushing of non-carbonate rocks (gabbro) (H2).

The size distribution of filler particles was detected by laser diffraction of particles in liquid flow. The measurements were carried out on an ANALYSETTE 22 NanoTec plus instrument using FRITSCH MaS control software. The obtained results are presented in Figure 2 and Table 1.

The specific surface area of the fillers was carried out on a NOVA Series 1200e Quantachrome (USA) by low-temperature nitrogen adsorption. The specific surface area and pore volume of the studied samples were obtained from the analysis of  $N_2$  adsorption-desorption isotherms at  $-196^\circ\text{C}$  (77K) measured in the region of equilibrium relative vapor pressures ( $P/P_0$ ) from  $10^{-3}$  to 0.995. The samples were pre-degassed at  $180^\circ\text{C}$  for 3 hour. The true density, specific surface area and porous structure parameter values of the fillers determined by the BET method are presented in Table 1. The measurement error did not exceed 5–7%.

In accordance with the IUPAC classification [23], the average pore diameter of both fillers is characteristic of a structure with a predominance of mesopores. The results showed that filler H2 differs from filler H1 in having larger particle size, higher true density and lower values of specific surface area, pore volume and pore size.

- Adhesion Additive:

A surfactant applied in road construction to improve the adhesion of petroleum road bitumen to stone materials of both acidic and basic rocks was used as an adhesion additive (AD).

The IR spectrum of the adhesive additive was carried out on a Thermo Scientific Nicolet iS50 FT-IR spectrometer, it is shown in Fig. 3.

When studying the IR spectrum of the adhesive additive, well-defined peaks at 2952, 2922 and  $2852\text{ cm}^{-1}$

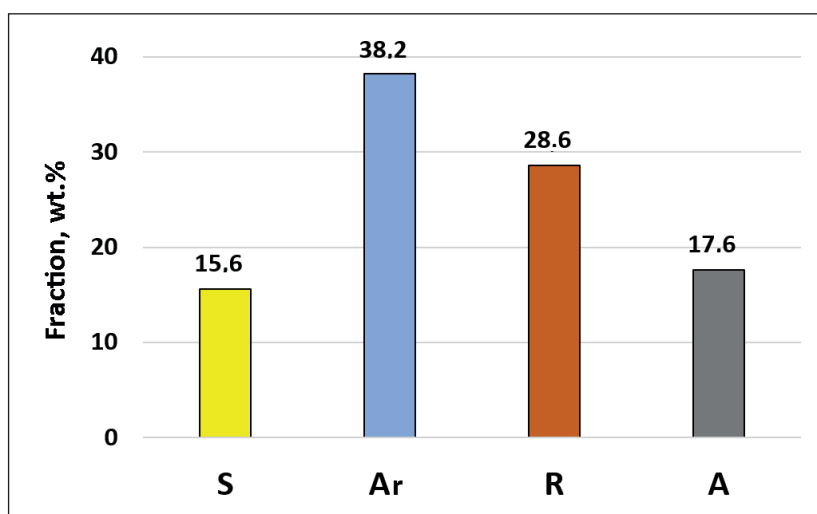


Fig. 1. Group chemical composition of bitumen: paraffin-naphthenic hydrocarbons (S), aromatic hydrocarbons (Ar), resins (R), asphaltenes (A)



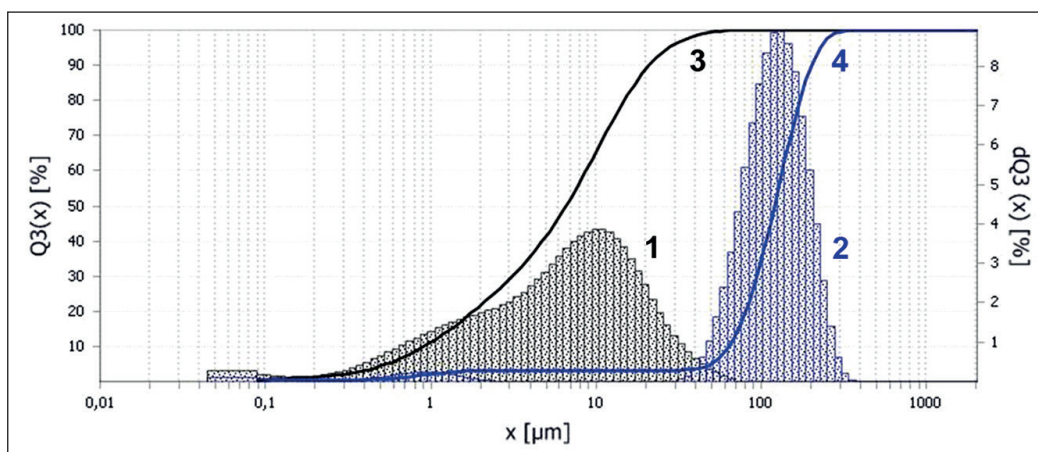


Fig. 2. Differential (1, 2) and integral (3, 4) curves of filler particle size distribution: H1 (1, 3), H2 (2, 4)

Table 1

Basic parameters of fillers

Parameter		Filler	
		H1	H2
Size distribution	$D_{50}, \mu$	7	120
	$D_{75}, \mu$	13	160
	$D_{90}, \mu$	21	201
True density, $\rho, \text{g/cm}^3$		2.71	3.05
Specific surface area, $S_{\text{BET}}, \text{m}^2/\text{g}$		4.214	1.437
Total pore volume at relative pressure $P/P_0 = 0.99, V_t, \text{cm}^3/\text{g}$		0.0106	0.002742
Average pore diameter, $D_{\text{pore}}, \text{nm}$		10.1	7.63

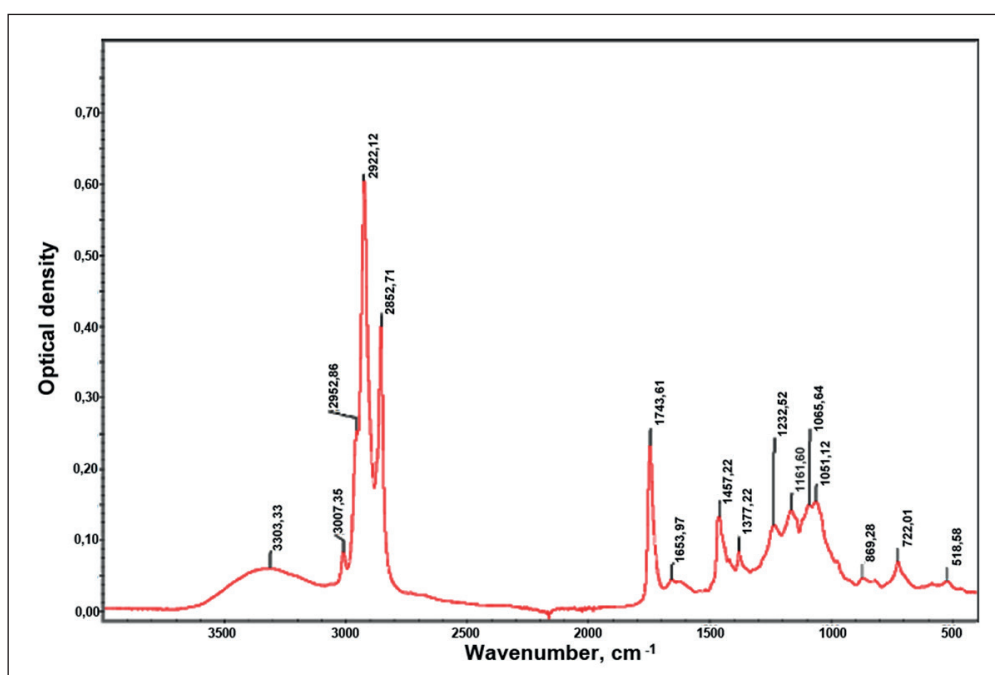


Fig. 3. IR spectrum of the adhesive additive



corresponding to  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$  and  $-\text{CH}$  groups were observed. The presence of weaker intensity peaks at 1457 and  $1377\text{ cm}^{-1}$  indicates a significant content of saturated and aromatic hydrocarbons (paraffins, oils, etc.). The absorption band in the region  $3005\text{--}3007\text{ cm}^{-1}$  is formed by valence C–H vibrations manifested in unsaturated fatty acids. The broad absorption band at  $3300\text{ cm}^{-1}$  refers to the valence vibrations of O–H bonds of phenol. The absorption band at  $1743\text{ cm}^{-1}$  characterizing carbonyl groups of esters of saturated acids is clearly expressed. Absorption bands in the region of  $1600\text{--}1560\text{ cm}^{-1}$ , are characteristic of functional groups C=O of amino acids. The peak at the wave number  $1065\text{ cm}^{-1}$  refers to the valence vibrations of C–N bonds.

### Preparation of samples for rheological tests

It is known that the thermal history of samples, plate size, thickness of the gap between the plates of the rheometer, etc., can affect the results of rheological measurements [24]. Therefore, all samples for rheological tests were prepared and tested under the same conditions.

Sample B was bitumen BND 100/130, heated to  $160^\circ\text{C}$  and stirred at this temperature for 3 minutes at a stirrer speed of 600 rpm.

Sample B-AD was prepared in a similar manner by adding 0.7 wt.% adhesion additive to the bitumen before heating it.

Mastics AB1 and AB2 were prepared by mixing BND 100/130 bitumen (B) and filler (H1 and H2, respectively) preheated to  $T = 160^\circ\text{C}$  for 3 minutes at a stirrer rotation speed of 600 rpm. The mass of fillers was selected taking into account the true density so that the volume fraction ( $\varphi$ ) of fillers in AB was the same and amounted to 0.275.

When preparing samples of mastic AB1-AD and AB2-AD containing adhesion additive and filler H1 and H2, respectively, AD was preliminarily introduced into bitumen in the amount of 0.7 wt.% before its heating.

Immediately after preparation, the samples were poured into 8 mm diameter silicone molds to eliminate the reheating procedure, left for 24 hours at room temperature and then used for rheological tests.

### Test methods

Rheological tests were performed on a dynamic shear rheometer “MCR 702e” (“Anton Paar”) with parallel plate geometry with a diameter of 8 mm. The measuring gap was 2 mm. Samples were removed from silicone molds, and placed between rheometer plates heated to  $64^\circ\text{C}$ . The specimens were trimmed at the same temperature. The discrepancy of the measured parameters from the average value did not exceed 3–7%.

Frequency sweeps were performed over a frequency range of 0.1 to 100 rad/s at a strain ( $\gamma$ ) of 0.05% at tem-

peratures from 30 to  $-10^\circ\text{C}$  in steps of  $10^\circ\text{C}$  to evaluate the interfacial interaction. The strain of 0.05% was chosen because it is in the LVE range for all samples at  $-10^\circ\text{C}$  (the minimum value observed for AB was 0.15%). The one specimen was used, which was thermostated after reaching the specified test temperature for 10 minutes.

Parameter  $K\text{--}B\text{--}G^*$  characterizing physicochemical interaction between mineral powder and bitumen by means complex modulus was determined by formula (1). When determining the ratio of complex modulus of mastic to matrix ( $G_c^*/G_m^*$ ) for AB1 and AB2, the data for bitumen were used as a matrix, and for AB1-AD and AB2-AD – for bitumen with adhesion additive (B-AD).

The thickness of adsorbed layer ( $d$ ) was determined by formula (12):

$$d = \frac{\varphi_{\text{eff}} - \varphi}{\varphi \cdot \rho \cdot s}, \quad (12)$$

where  $\varphi_{\text{eff}} = \varphi \cdot (K\text{--}B\text{--}G^*)$  – effective volume fraction of filler, i.e. filler together with adsorbed bitumen layer,  $\varphi$  – volume fraction of filler;  $\rho$  – density of filler,  $s$  – specific surface of filler.

Fatigue tests by linear amplitude sweep (LAS according to [12]) were performed in the temperature range from 16 to  $1^\circ\text{C}$  with a step  $3^\circ\text{C}$ . The upper temperature of the test range was chosen so that the initial value of loss modulus ( $G^*\sin\delta$ ) of bitumen or bitumen with adhesion additive exceeded 5–6 MPa. A new specimen was used for each temperature. The first part of the test was performed in frequency sweep mode ( $\omega = 0.2\text{--}30\text{ Hz}$  at strain of 1%). Then, using the same specimen, the second part of the tests was performed in the mode of stepwise linear amplitude sweep at the frequency of 10 Hz in the strain range of 0.1%; 1% and further in steps of 1% to 30% (100 cycles at each strain value, total 3100 cycles).

## RESULTS

### Interfacial interaction and adsorbed layer thickness in mastics

In the first stage of the work, the interfacial interaction by the  $K\text{--}B\text{--}G^*$  parameter in mastics without adhesive additive (AB1 and AB2) and in its presence (AB1-AD, AB2-AD) was investigated by the frequency sweep method. A testing feature was that a single specimen was used for sequence measurements at five temperatures, starting from  $30^\circ\text{C}$  and up to  $-10^\circ\text{C}$  in increments of  $10^\circ\text{C}$  and with the specimen thermostated at each temperature.

As can be seen in Figure 4, at the same filler volume fraction (0.275), a value of the  $K\text{--}B\text{--}G^*$  parameter is higher for the AB1 sample both without and in the presence of the adhesion additive, i.e., when H1 carbonate mineral powder was used as a filler.



The  $K-B-G^*$  parameter of mastic AB2 based on the filler of non-carbonate rock powder (gabbro) H2 was more sensitive to the adhesive additive. At the same time, the sensitivity to the effects of temperature and frequency was less for the AB2-AD sample than for the AB1-AD sample.

Figure 5 is shown plots of the dependence of adsorbed layer thickness ( $d$ ) on temperature and test frequency for all mastics. The adsorbed layer thickness in samples without adhesion additive ranges from 60 to 30 nm for AB1 and from 75 to 10 nm for AB2 (see Figures 5a and 5b).

The introduction of an adhesion additive (AD) into the mastics increases  $d$  in both cases (see Figs. 5 c and 5 d). This effect is seen to a lesser extent for the AB1-AD

sample, which includes the filler H1. At the same time, it can be noted a tendency to increase the dependence of the adsorbed layer thickness on temperature compared to the AB1 sample without the adhesive additive. For AB2-AD based on H2, an increase in the thickness of the interfacial layer by more than 2 times (up to 190–150 nm) can be noted in comparison with AB2.

### Fatigue tests

The range of test temperatures is recommended to be selected so that the complex shear modulus is in the range from 12 to 60 MPa where the failure mechanism is based on the fatigue properties of the material without

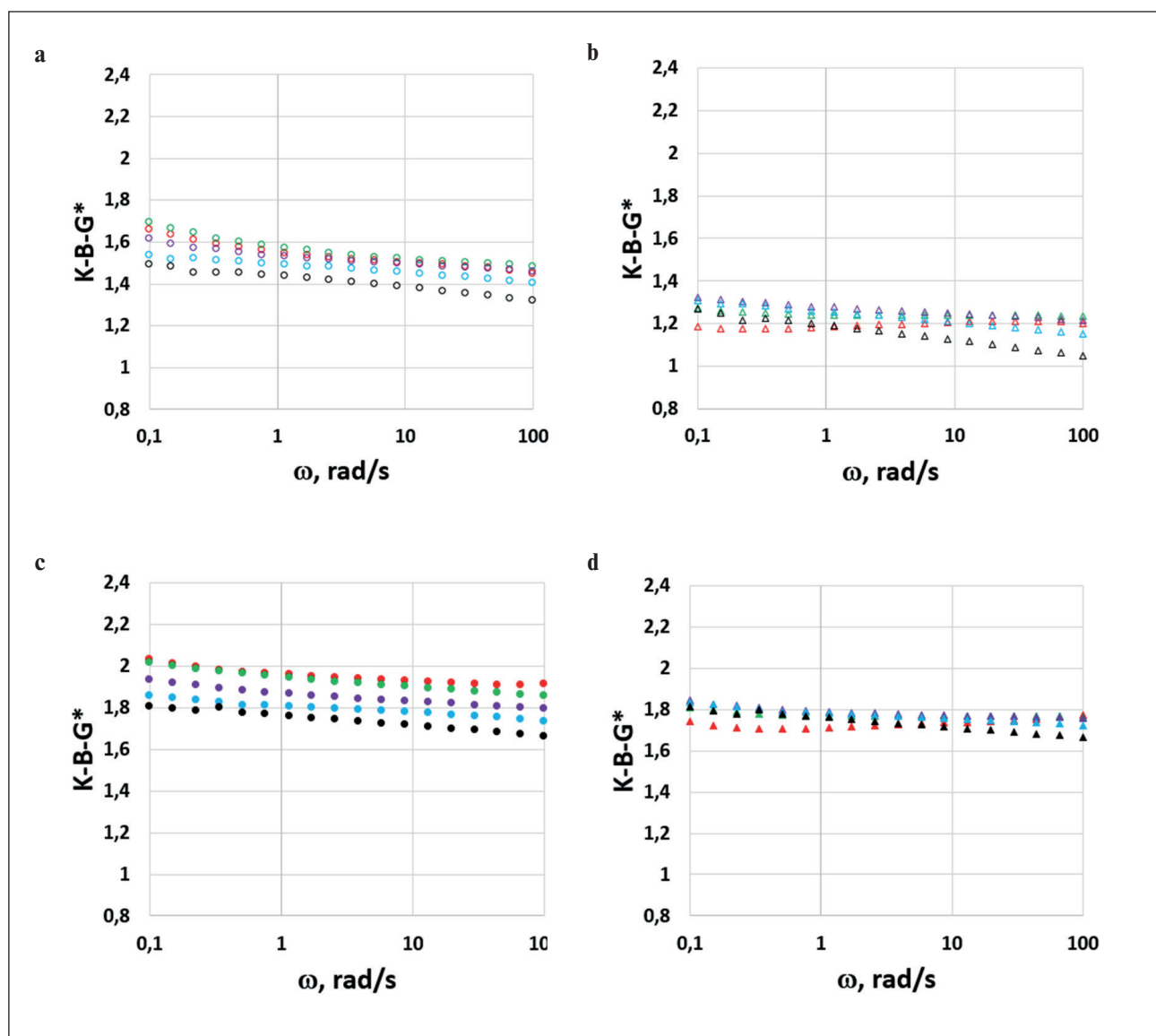


Fig. 4. Plots of dependence of the interfacial interaction parameter  $K-B-G^*$  on the test frequency ( $\omega$ ) for samples: AB1 (a), AB2 (b), AB1-AD (c), AB2-AD (d) at temperatures 30 (red), 20 (green), 10 (purple), 0 (blue), and  $-10^\circ\text{C}$  (black)



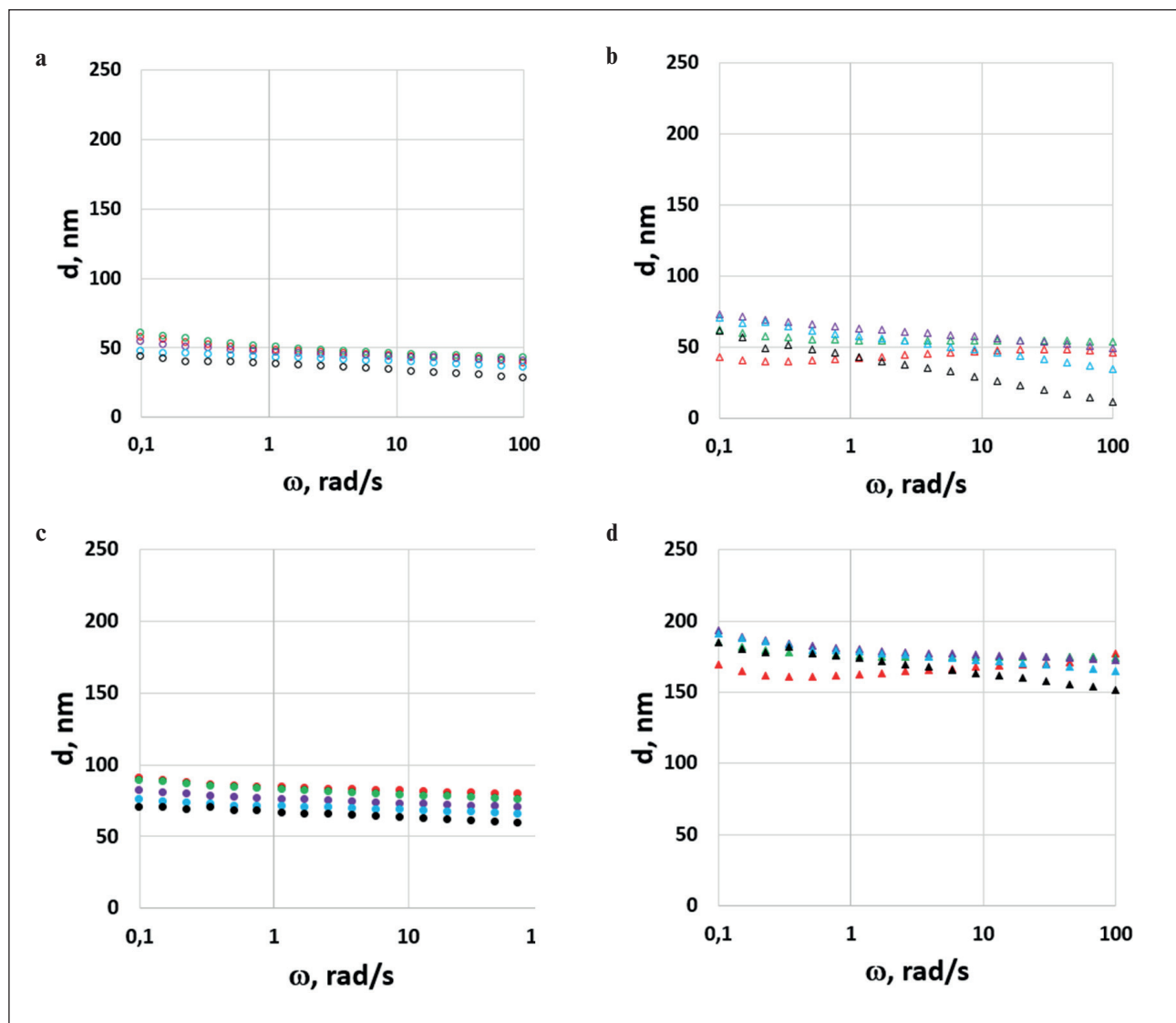


Fig. 5. Plots of dependence of adsorbed layer thickness  $d$  on test frequency ( $\omega$ ) for samples: AB1 (a), AB2 (b), AB1-AD (c), AB2-AD (d) at temperatures of 30 (red), 20 (green), 10 (purple), (0 (blue) and  $-10^{\circ}\text{C}$  (black)

the influence of plastic flow and loss of adhesion [25]. Table 3 shows the relationship of the parameters  $G^*$  ( $I_D$ ) and  $G^*\sin\delta$  ( $C_0$ ) to the test temperature. According to the conventional approach,  $I_D$  was defined as the initial value of the complex modulus  $G^*$  at a strain of 1%; and  $C_0$  as the average value of  $G^*\sin\delta$  at a strain of 0.1%.

As can be seen from Table 3, the bitumen sample (B) has  $C_0 = 6.6$  MPa at temperature  $16^{\circ}\text{C}$ , which is quite close to the values characterizing not fatigue behavior, but plastic flow during testing. It can also be seen from the above data that the introduction of fillers into bitumen resulted in an increase in  $I_D$  and equi-stiff (or close to it) were found when tested 6 degrees higher. The introduction of adhesion additive in bitumen and AB decreased the  $I_D$  value of the samples and equi-stiff samples were found in all cases when tested 3 degrees lower.

Thus, for example, the values of  $I_D$  parameter close to 22 and 32 MPa correspond to test temperatures 10 and  $7^{\circ}\text{C}$  for bitumen, 7 and  $4^{\circ}\text{C}$  for B-AD, 16 and  $13^{\circ}\text{C}$  for AB1 and AB2, 13 and  $10^{\circ}\text{C}$  for AB1-AD and AB2-AD. At the same time, as can be seen in Figure 6, which shows the plot of shear stress ( $\tau$ ) versus strain ( $\gamma$ ), during fatigue testing, the behavior of equi-stiff specimens with and without adhesive additive differs significantly.

Thus, in Figure 6a, curves 1 (bitumen, at  $10^{\circ}\text{C}$ ) and 4 (bitumen with adhesion additive at  $7^{\circ}\text{C}$ ) correspond to equi-stiff specimens. Decreasing the test temperature for samples B and B-AD leads to an increase in the maximum shear stress and a decrease in the corresponding strain. The introduction of the adhesive additive into the bitumen reduces the maximum shear stress, which should have a positive effect on fatigue life, but changes the



Table 2

Dependences of  $I_D$  and  $C_0$  parameters on test temperature

Parameter		Sample					
		B	B-AD	AB1	AB1-AD	AB2	AB2-AD
$I_D$ , MPa							
Temperature, °C	16	10.2		22.1		21.4	
	13	14.5		33.8	24.8	35.8	19.6
	10	22.1	12.3	53	29.4	48	31
	7	31.7	20.2	61.8	50.6	59.5	43.5
	4	42.1	31.6		76.2		63.8
$C_0$ , MPa							
Temperature, °C	16	6.6		15.9		15.7	
	13	9.0		22.9	16.3	24.7	13.5
	10	12.6	7.4	32.5	17.9	29.1	20.0
	7	16.8	11.0	35.5	30.9	36.6	26.0
	4	21.4	16.5		40.7		36.7

Note: cell toning was performed for two groups of equi-stiff (or close to it) samples

post-peak behavior of the curve, which apparently may reflect a more rapid failure of the specimen during testing. A similar trend of sharper decrease in  $\tau$  after passing the maximum can be observed by comparing the curves  $\tau(\gamma)$  of equi-stiff AB and AB-AD specimens (Fig. 6b).

The Damage Intensity Curve (Damage Curve) is analyzed to characterize the fatigue life in VECD theory as

its behavior reflects the loss of structural integrity of the material under cyclic loading. Figure 7 plots the Damage Curve as a function of the ratio of the parameter  $C$  (current loss modulus ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) in the model of dissipated strain energy (see Fig. 7a and 7b) or complex modulus ( $G^*$ ) in the model of pseudo-strain energy (see Fig. 7c and 7d), to its initial value  $C_0$ . It should be remembered, con-

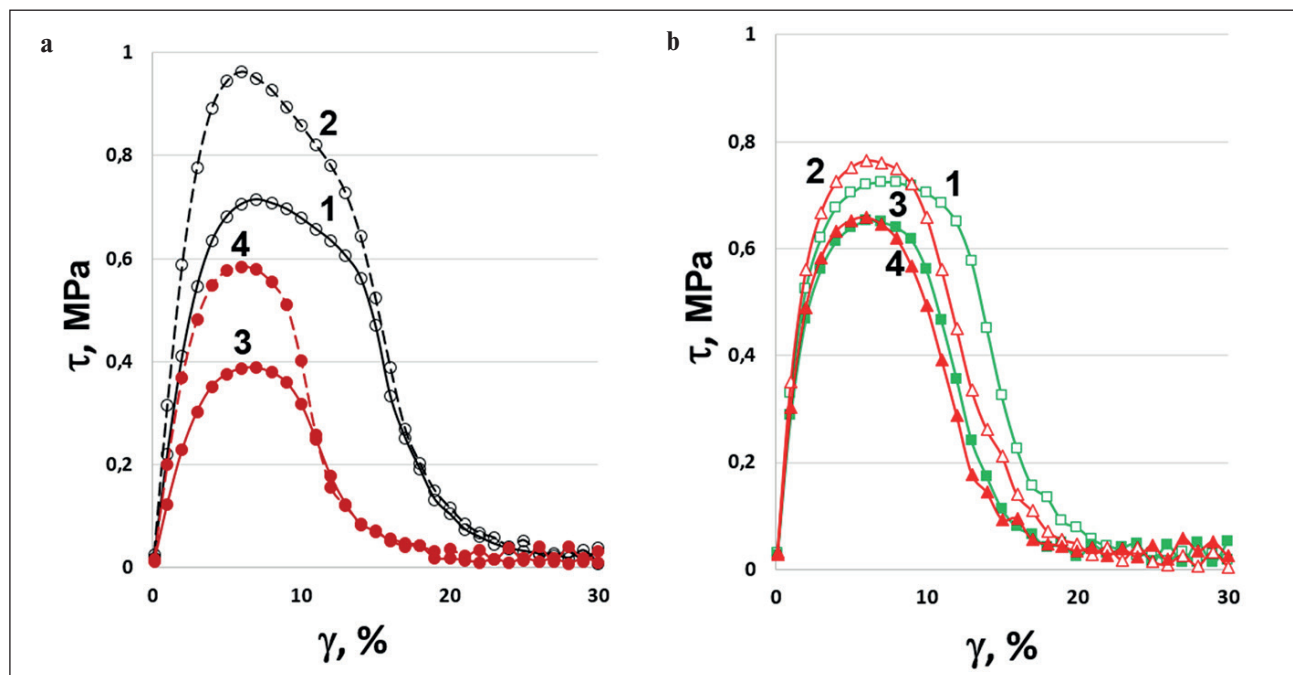


Fig. 6. Dependence of shear stress ( $\tau$ ) on strain ( $\gamma$ ) for samples: a) bitumen (1, 2) and B-AD (3, 4) at temperatures 10 (1, 3) and 7°C (2, 4); b) for AB1 (1) and AB2 (2) at 13°C and AB1-AD (3) and AB2-AD (4) at 10°C.



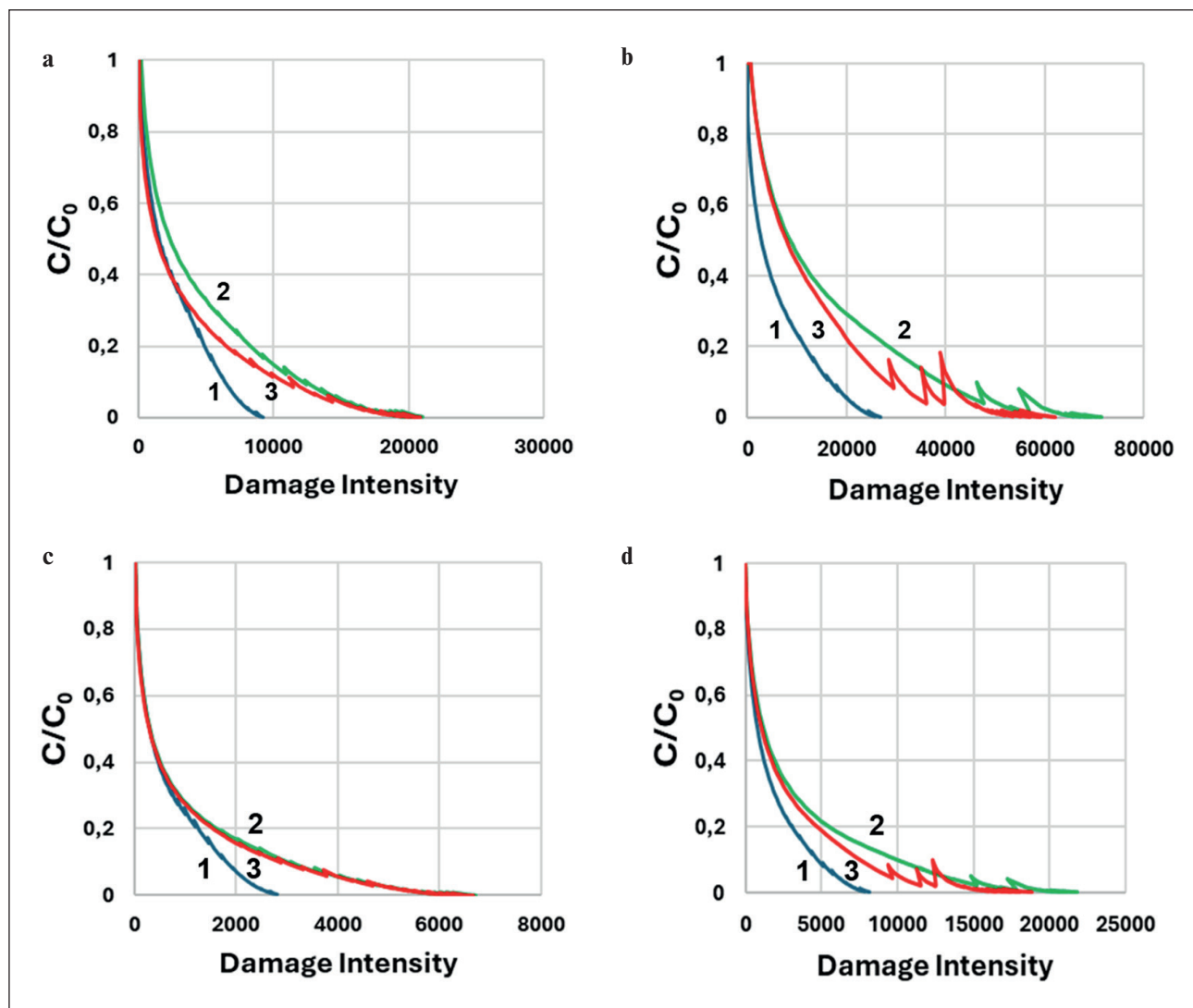


Fig. 7. Dependence of  $C/C_0$  on Damage Intensity: (a) at temperature 16°C (a, c) and 10°C (b, d) for samples: B (1), AB1 (2), AB2 (3) according to the models of dissipated strain energy (a, b) and pseudo-strain energy (c, d).

sidering the presented data, that the value of  $C/C_0 = 1$  corresponds to the strain  $\gamma = 0.1\%$ , and the minimum value of  $C/C_0$  for each curve is fixed at  $\gamma = 30\%$ . The appearance of cogs is probably related to the peculiarities of Damage Intensity calculation by different models and edge effects at large shear strains.

As can be seen from Fig. 7a and 7c, bitumen shows the least damage intensity for both calculation models at temperature 16°C, while for mastic samples there is practically no difference between the curves when calculated by the pseudo-strain energy method. At lower temperatures (see Figs. 7b, 7d and Fig. 8), as well as at the introduction of an adhesive additive (Fig. 8), the advantage of the AB2 sample is manifested, which may be due to the thicker adsorbed layer.

It should be noted that at 7°C the resistance to fracture of bitumen sample without adhesive additive deteriorates

(Fig. 8 a, c), so that the curve of bitumen is close to the curve AB2. It is possible to assume that in this temperature range patterning processes are occurring associated with crystallization of n-alkanes (paraffins), taking into account the high (15.6%) content of paraffin-naphthenic hydrocarbons in bitumen (see Fig. 1). [25]. Bitumen patterning leads to the appearance of new interfaces, along which microcracks can also nucleate. The inclusion of an adhesion additive seems to shift bitumen patterning to lower temperatures, and at 7°C (Fig. 8b and 8d), bitumen with an adhesion additive again has an advantage over mastic with the same AD.

Figure 9 shows the curves of dependence of Damage Intensity on temperature. The calculation was performed using the model of dissipated strain energy and two variants of the failure criterion (failure) –  $C/C_0 = 0.65$  [12] and  $C/C_0$  at  $\tau_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$  in the amplitude sweep test. The



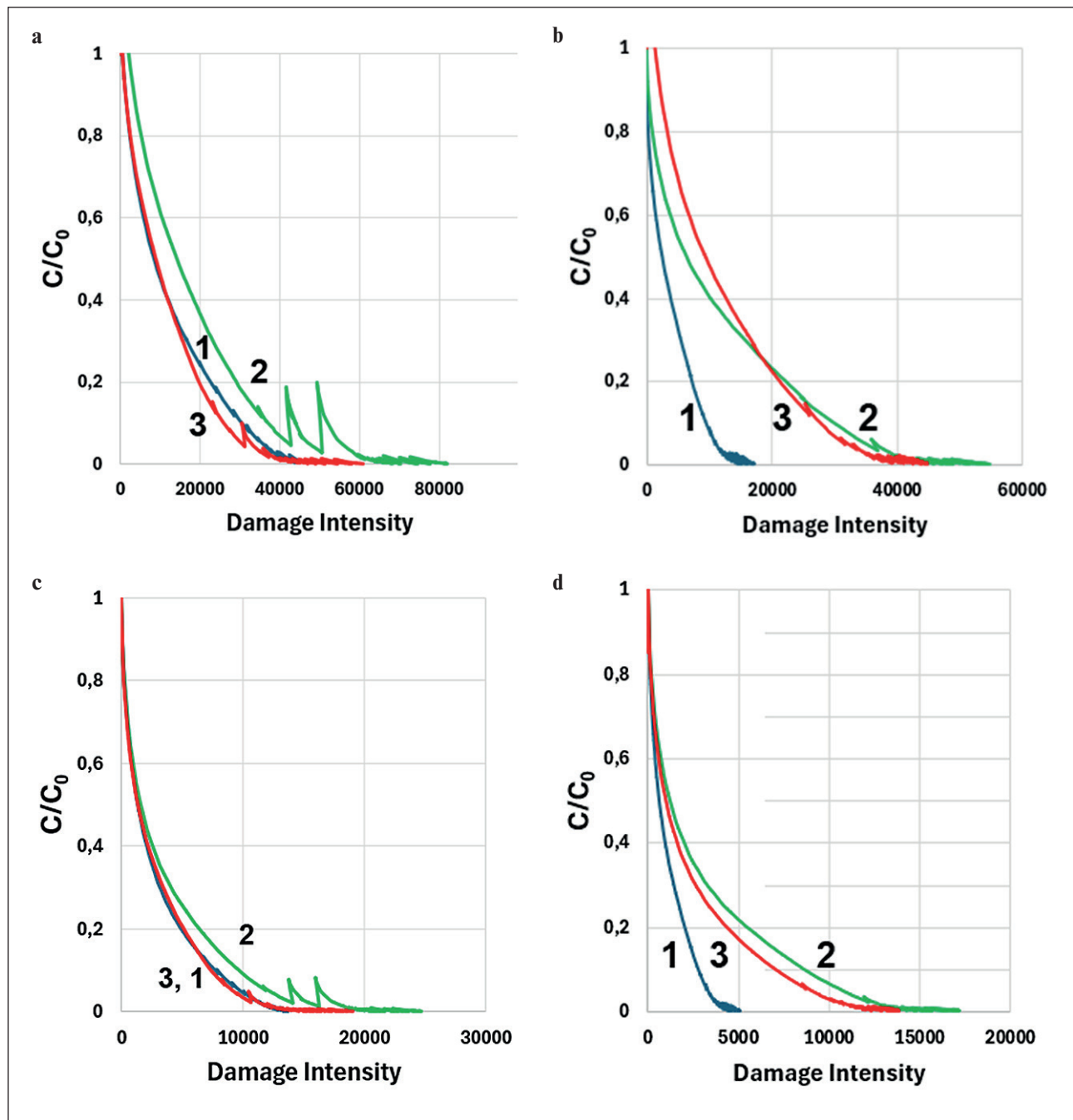


Fig. 8. **Dependence of  $C/C_0$  on Damage Intensity:** (a) at  $7^\circ\text{C}$  for specimens without AD (a, c) and with AD (b, d): B (1) AB1 (2), AB2 (3) according to models I (a, b) and II (c, d)

parameter  $\alpha$ , included in the calculation of Damage Intensity, was defined in two ways:  $\alpha = 1 + 1/m$  and  $\alpha = 1/m$ .

Figure 10 shows similar curves calculated using the pseudo-strain energy model for the failure criterion –  $C/C_0$  at  $\tau_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$  and for the two variants of the parameter  $\alpha$ :  $\alpha = 1 + 1/m$  and  $\alpha = 1/m$ .

For all variants of calculations, failure criteria and variants of the parameter  $\alpha$ , it is possible to find the general tendencies that at one temperature the ranking of

specimens in the order of decreasing accumulated damage (Damage Intensity) is as follows: AB1, AB2, AB1-AD, AB2-AD. Comparing the data shown in Figures 9–10 and Figures 5 and 7–8, one can see a certain correlation between the thickness of the adsorbed layer ( $d$ ) and Damage Intensity: an increasing in  $d$  leads to a decreasing Damage Intensity.

Unfortunately, the application of both VECD models for calculation of the parameter  $N_f$  did not give an unam-



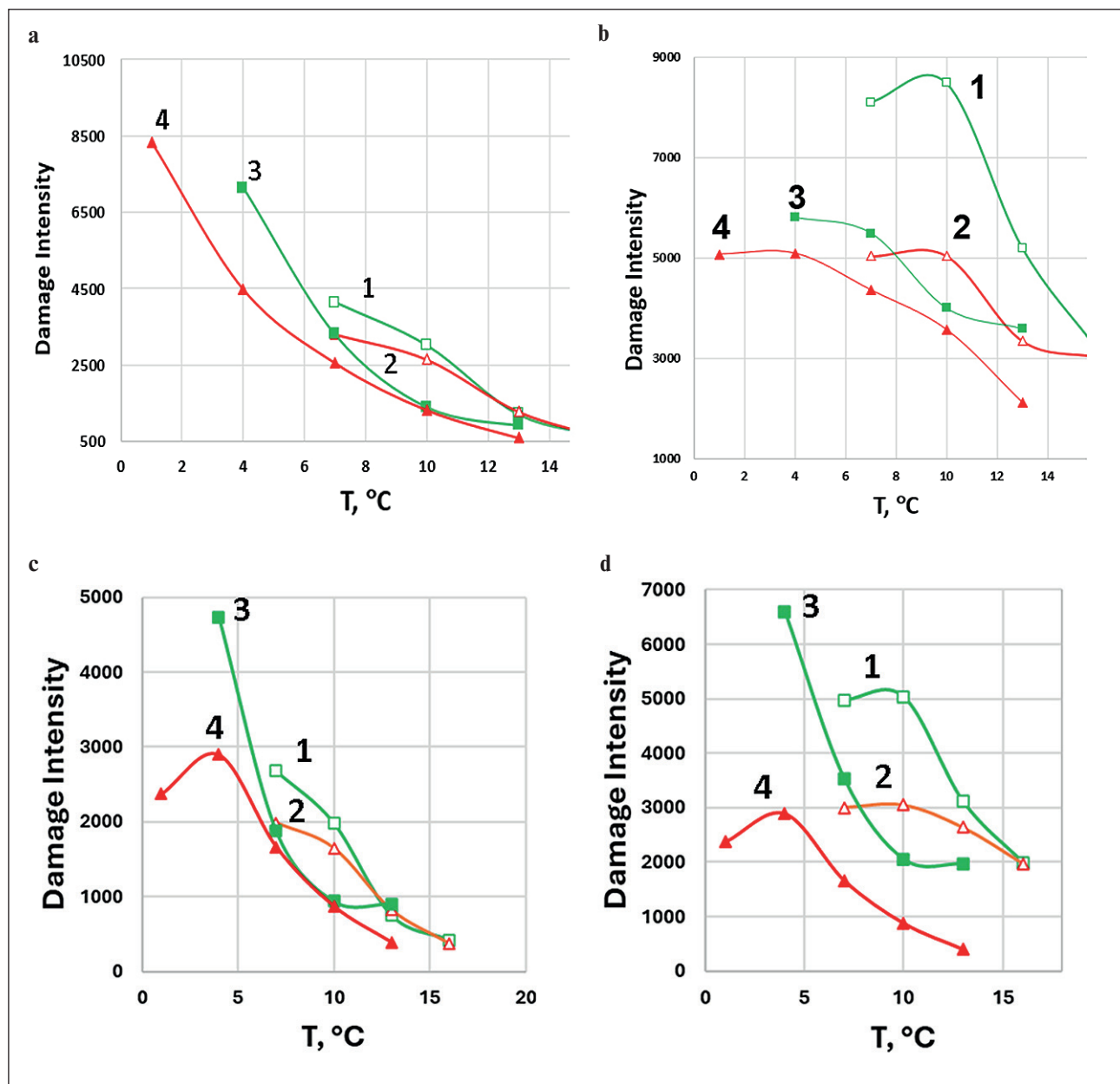


Fig. 9. Dependence of damage accumulation (Damage Intensity) on temperature at  $\alpha = 1+1/m$  (a, b) and  $\alpha = 1/m$  (c, d) and failure criteria:  $C/C_0 = 0.65$  (a, c),  $C/C_0$  at  $T_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$  (b, d) for samples AB1 (1), AB2 (2), AB1-AD (3), AB2-AD (4)

biguous result. Figure 11 shows the temperature dependence of the parameter number of cycles to failure ( $N_f$ ) for strains of 2.5, 5, and 15% for mastic specimens using the strain energy dissipation model at  $\alpha = 1+1/m$  and  $\alpha = 1/m$  and the failure criterion at  $\tau_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$ . For all specimens,  $N_f$  decreases with decreasing temperature. In the absence of adhesion additive, the  $N_f$  values for specimen AB1 are close to bitumen (curve not shown) and exceed the  $N_f$  values for specimen AB2. Addition of adhesion additive slightly decreases  $N_f$  for bitumen (curve not given) and AB1, while an increase in fatigue life is

observed for AB2, regardless of which formula is used to calculate the parameter  $\alpha$ .

The plots of  $N_f$  dependence on temperature have the same character when calculated by the pseudo-deformation energy model for samples without adhesive additive, but there is practically no difference between samples AB1 and AB2, regardless of the way of the choice of the parameter  $\alpha$ . The AB2-AD specimen shows a slightly higher fatigue life compared to AD1. But the curve  $N_f(t)$  of the bitumen sample with adhesion additive shows an increase with decreasing temperature (the curve is not



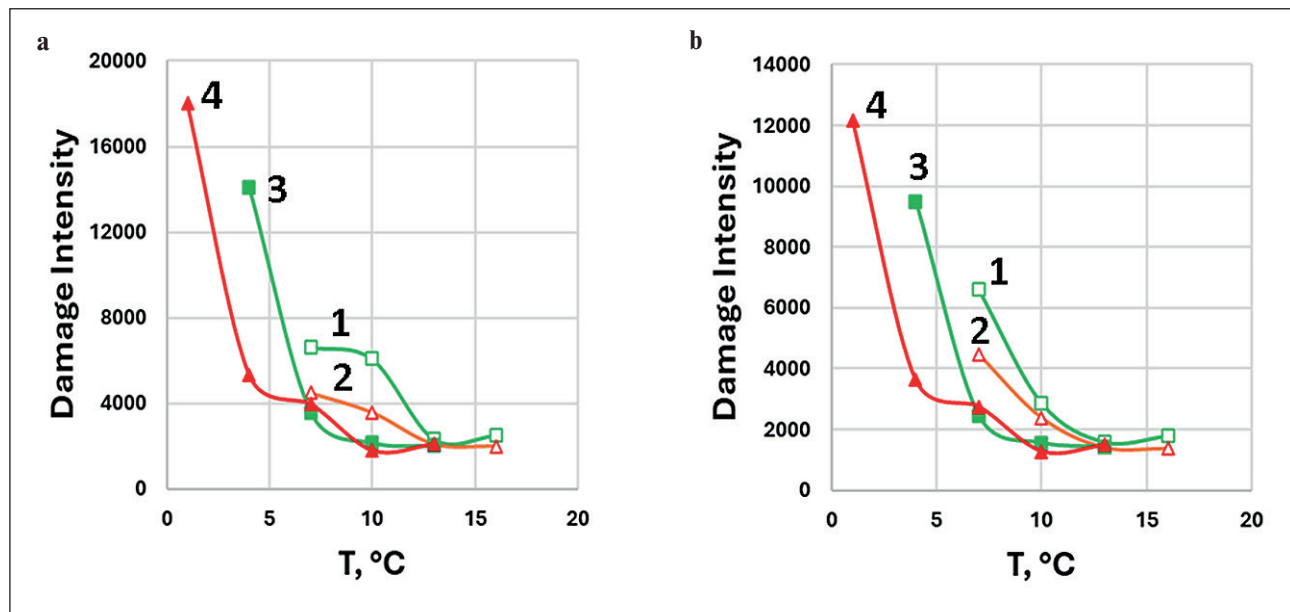


Fig. 10. Dependence of damage accumulation (Damage Intensity) on temperature at pseudo-deformation energy model calculation at  $\alpha = 1+1/m$  (a) and  $\alpha = 1/m$  (b) and failure criterion  $C/C_0$  at  $T_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$  for samples AB1 (1), AB2 (2), AB1-AD (3), AB2-AD (4)

given), which makes us doubt the applicability of this calculation method for predicting fatigue life in such samples.

Thus, it was possible to see only some trends in the influence of the adsorbed layer thickness in mastic and

mastics containing an adhesive additive on damage accumulation (Damage Intensity) but not on the fatigue parameter  $N_f$ .

An interesting consistency was observed in the parameter  $F$ , which actually refers the rate of pseudo-deforma-

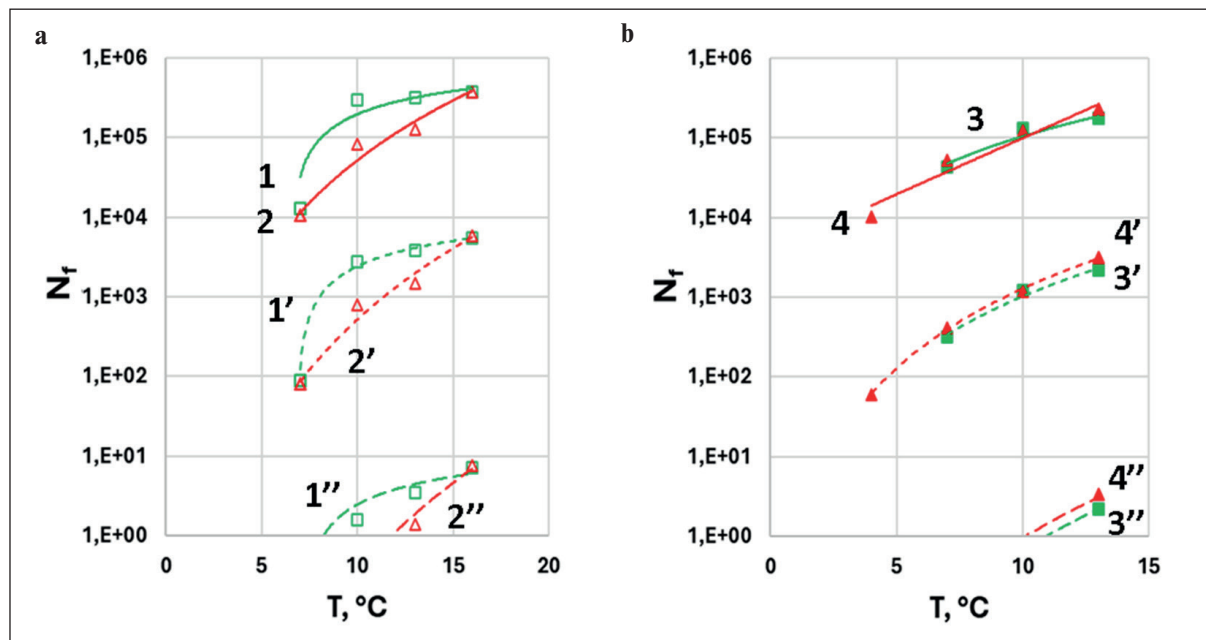


Fig. 11. Dependence of the number of cycles to failure ( $N$ ) when calculated by the dissipated strain energy model at  $\alpha = 1+1/m$  (a, b) and  $\alpha = 1/m$  (c, d) and by the pseudo strain energy model at  $\alpha = 1+1/m$  (e, f) and  $\alpha = 1/m$  (g, h) at failure criterion (failure, failure)  $\tau_{max}$  on the curve  $\tau(\gamma)$  for specimens AB1 (1), AB2 (2); AB1-AD (3), AB2-AD (4) at strains of 2. 5% (1-4), 5% (1'-4') и 15% (1''-4'')



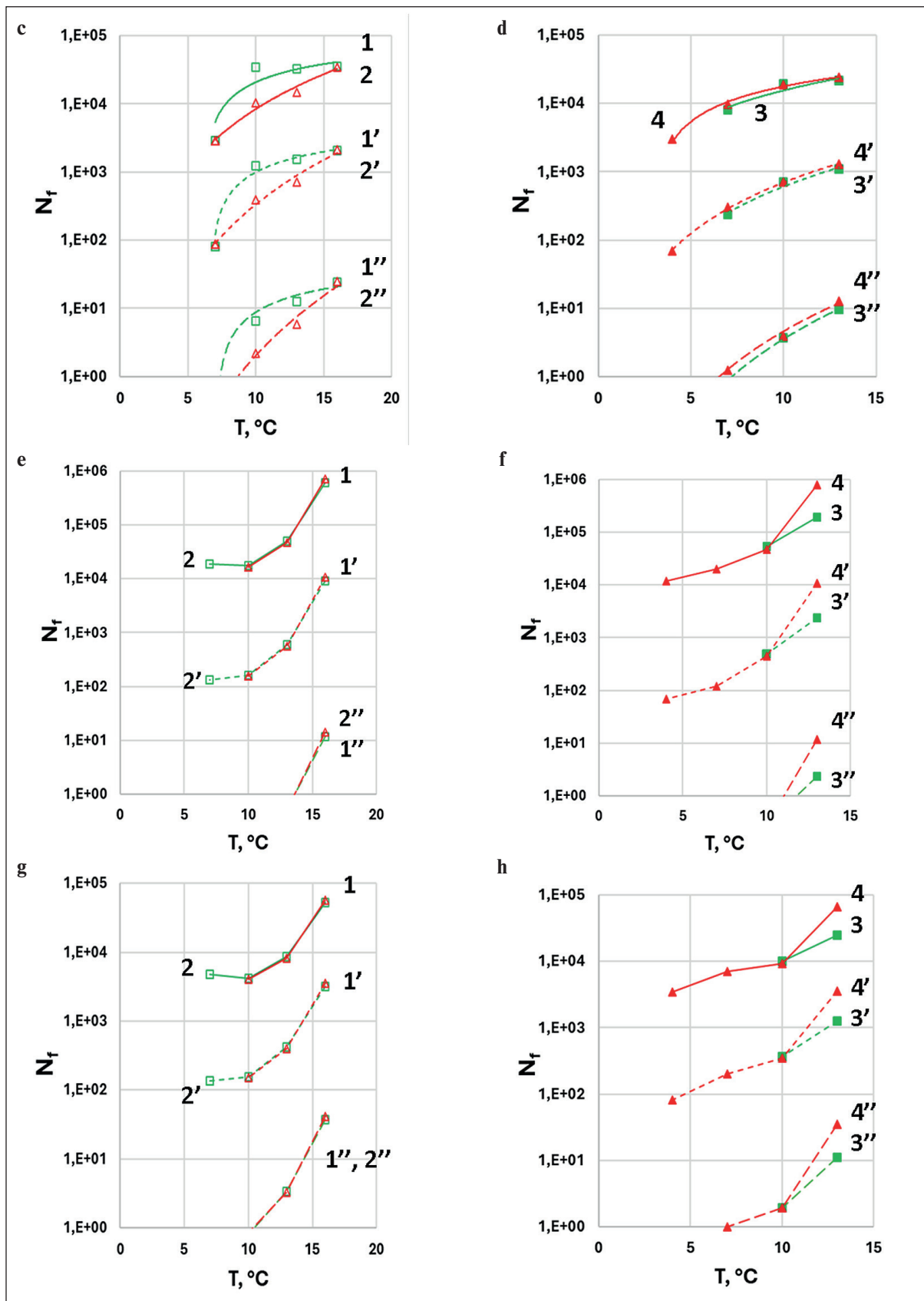


Fig. 11. The End



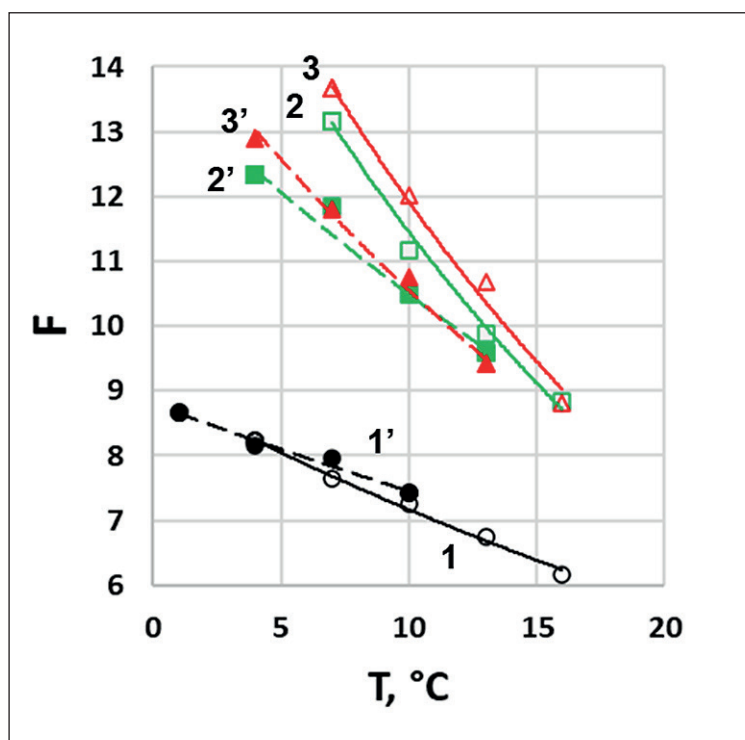


Fig. 12. Temperature dependence of the parameter  $F$  for samples: bitumen (1), AB1 (2), AB2 (3); B-AD (1'), AB1-AD (2'), AB2-AD (3')

tion energy build-up. It was shown earlier that a lower value of the  $F$  parameter is related to a higher fatigue life of the specimen [26]. As can be seen in Figure 12, the use of filler H2 leads to a stronger regression in the fatigue life of bitumen compared to H1. The use of adhesive additive leads to a decrease in the value of  $F$  for mastic, i.e. increases the fatigue life, and this increase is more marked for AB with filler H2, which has a thicker adsorbed layer. It should be noted that for bitumen the effect of adhesion additive on this parameter is practically not present.

## CONCLUSION

Standard mineral powder of carbonate rocks (H1) and filler of non-carbonate (gabbro) rocks (H2) differing from H1 by larger particle size, higher true density and lower values of specific surface area, pore volume and pore size were used. At the same filler volume fraction (0.275) in asphalt mastic based on BND 100/130 bitumen, a higher value of the  $K-B-G^*$  parameter, both without and in the presence of the adhesive additive, was observed for the mastic (AB) sample based on H1 filler. The use of

adhesive additive (AD) into the mastic based on H2 filler resulted in a greater increase in the  $K-B-G^*$  parameter compared to H1-based AB, and a decrease in its sensitivity to temperature and test frequency. The thickness of adsorption layer significantly increases in mastic with filler H2 by using adhesion additive

Different models of VECD theory, fracture criteria and variants of the unbroken structure parameter  $\alpha$  were used to estimate fatigue life from LAS test results. For all versions of the calculation For all versions of calculations the tendencies of saving the ranking of samples by resistance to accumulation Damage Intensity at one temperature are observed:  $AB1 < AB2 < AB1-AD < AB2-AD$ .

Unambiguous data on the dependence of the fatigue life parameter – the number of cycles to failure ( $N_f$ ) on temperature failed to be obtained. It is shown that an increase in the thickness of the adsorption (interphase) layer leads to an improvement in fatigue resistance determined by the fatigue criterion  $F$ .

The work will be continued with expansion of the range of investigated objects: bitumens, fillers and adhesion additives.

## REFERENCES

1. Kolbanovskaya A.S., Mikhailov V.V. *Road bitumens*. Moscow: Transportation; 1973. (In Russ.)
2. Pyrig Ya.I. A review of methods for evaluating the adhesion of bitumen to stone materials // *Vіsник KHNADU*. 2019; 85:73–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.73>



3. Cardone F., Frigio F., Ferrotti G., Canestrar F. Influence of mineral fillers on the rheological response of polymer-modified bitumens and mastics. // *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition). 2015; 2(6):373–381. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.06.003>
4. Chen M., Javilla B., Hong W., Pan C., Riara M., Mo L. Rheological and Interaction Analysis of Asphalt Binder, Mastic and Mortar // *Materials*. 2019; 12 (1):128. <https://doi.org/10.3390/ma12010128>
5. Guo M., Tan Y. Interaction between asphalt and mineral fillers and its correlation to mastics' viscoelasticity // *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(1):1–10. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1575379>
6. Guo M., Bhasin A., Tan Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder // *Construction and Building Materials*. 2017; 141:152–159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.051>
7. Palierne J.F. Linear rheology of viscoelastic emulsions with interfacial-tension // *Rheologica Acta*. 1990; 29(3):204–214.
8. Hintz C., Velasquez R., Johnson C., Bahia H. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2207:99–106. <https://doi.org/10.3141/2207-13>
9. Riccardi C., Falchetto A.C., Wistuba M.P. Comparison of fatigue test methods on asphalt mastic. In book: *Functional Pavement Design. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design*. 2016. ISBN 9781138029248.
10. Christensen D.W., Tran N. Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures. *NCHRP RESEARCH REPORT 982*. 2022. Washington, DC. ISBN 978-0-309-09342-2. <https://doi.org/10.17226/26302>
11. Schapery R. A. A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990; 38(2):215–253. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(90\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0022-5096(90)90035-3)
12. AASHTO T391-20. Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, DC: AASHTO
13. Cao W., Wang W. New comprehensive analysis framework for fatigue characterization of asphalt binder using the Linear Amplitude Sweep test // *Construction and Building Materials*. 2018; 171:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.125>
14. Zhang H., Shen K., Xu G., Tong J., Wang R., Cai D., Chen X. Fatigue resistance of aged asphalt binders: An investigation of different analytical methods in linear amplitude sweep test // *Construction and Building Materials*. 2020; 241:118099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118099>
15. Safaei F., Castorena C., Kim Y.R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2016; 20:299–323. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9304-1>
16. Chen H., Bahia H.U. Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the LAS test // *International Journal of Fatigue*. 2021; 146:106150. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106150>
17. Wang C., Castorena C., Zhang J., Kim Y.R. Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. // *Road Materials and Pavement Design*. 2015; 16 (2):125–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077010>
18. Underwood B.S. A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2016; 82(3):387–401. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.020>
19. AASHTO TP101-14 Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
20. GOST 33133-2014 Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Bitumy neftyanyye dorozhnyye vyazkiye. Tekhnicheskiye usloviya. (In Russ.)
21. Metodika izmereniy gruppovogo khimicheskogo sostava tyazhelykh nefteproduktov metodom zhidkostno-adsorbtsionnoy khromatografii s gradiyentnym vytesneniyem. Ufa. 2014. 18 s. (In Russ.)
22. GOST R 52129-2003 Poroshok mineral'nyy dlya asfal'tobetonnykh i organomineral'nykh smesey. Tekhnicheskiye usloviya. (In Russ.)
23. International Union of Pure and Applied Chemistry Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids: “Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)” // *Pure and Applied Chemistry*. 1994; 66(8):1739–1758.
24. Sheidaei M., Gudmarsson A. Sample preparation techniques on dynamic shear rheometer testing: round robin tests on bitumen // *Road Materials and Pavement Design*. 2024; 25(3):474–491. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2213775>



25. Frolov I.N., Firsin A.A., Yusupova T.N., Okhotnikova E.S., Ziganshin M.A. Dynamics of formation of asphalt microstructure according to modulated differential scanning calorimetry data // *Petroleum Chemistry*. 2017; 57(12):1002-1006. <https://doi.org/10.1134/S0965544117120039>

26. Zhang J., Sabouri M., Guddati M., Kim Y. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading // *Road Materials and Pavement Design*. 2013; 14(2):1-15. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812843>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktoria N. Gorbatova** – Junior researcher, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, vik21477677@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1592-345X>

**Irina V. Gordeeva** – Cand. Sci. (Eng.), Sciences research associate, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ivgordeeva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9879-3701>

**Tatiana V. Dudareva** – senior researcher, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, yanadva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9698-8591>

**Irina A. Krasotkina** – senior researcher, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; vadnik29@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1047-079X>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**V.N. Gorbatova** – carrying out experimental work; collecting and systematization of experimental data.

**I.V. Gordeeva** – literature review; graphic and tabular presentation of the research results.

**T.V. Dudareva** – processing and analysis of experimental data; writing of the original text of the article; drawing of the final conclusions.

**I.A. Krasotkina** – scientific guidance; conceptualization and development of the research methodology; analysis of the research results; writing the original text of the article; drawing up the final conclusions.

#### The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.08.2024; approved after reviewing 30.09.2024; accepted for publication 07.10.2024.



Научная статья

УДК 665.775.4

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-415-430>

CC BY 4.0

## Влияние адгезионной добавки и природы наполнителя на межфазное взаимодействие и усталостные параметры в асфальтовых вяжущих

Виктория Николаевна Горбатова , Ирина Владимировна Гордеева , Татьяна Владимировна Дударева\* ,  
Ирина Александровна Красоткина 

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова, Российская академия наук,  
Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [yanadva@mail.ru](mailto:yanadva@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В работе исследовано влияние адгезионной добавки и природы наполнителя на усталостную долговечность и межфазное взаимодействие в асфальтовых вяжущих. **Материалы и методы исследования.** Для битума марки БНД 100/130 и асфальтовых вяжущих (АВ) на его основе, содержащих наполнители различной природы, на реометре динамического сдвига выполняли: а) частотную развертку в диапазоне частот от 0,1 до 100 рад/с при деформации ( $\gamma$ ) 0,05% при температурах от 30 до  $-10^{\circ}\text{C}$  с шагом  $10^{\circ}\text{C}$ ; б) циклические испытания (LAS test) при температурах от 16 до  $1^{\circ}\text{C}$  с шагом  $3^{\circ}\text{C}$ . Асфальтовые вяжущие готовили смешением битума (3 мин;  $160^{\circ}\text{C}$  и 600 об/мин) и наполнителя (объемная доля наполнителя – 0,275). Для исследования влияния адгезионной добавки (АД) на свойства битума и асфальтовых вяжущих ее в количестве 0,7% вводили в битум до наполнителя. Расчет кривой накопления повреждений при циклических нагрузках проводили по двум моделям теории VECD (система моделирования повреждений вязкоупругой сплошной среды): рассеянной энергии деформации и энергии псевдодеформации. **Результаты и обсуждение.** Исследовано влияние природы и свойств наполнителя, адгезионной добавки, температуры и частоты испытаний на параметр межфазного взаимодействия  $K-B-G^*$  и толщину адсорбированного слоя  $d$ . Проанализировано накопление повреждений в образце при циклических нагрузках и поведение усталостных параметров в зависимости от температуры испытаний при двух вариантах определения параметра  $\alpha$ . **Заключение.** Показано, что увеличение толщины межфазного слоя в асфальтовых вяжущих приводит к повышению их устойчивости к накоплению повреждений (Damage Intensity) в процессе усталостных испытаний (LAS), снижает скорость нарастания энергии псевдодеформации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** асфальтовое вяжущее, наполнитель, межфазное взаимодействие, толщина адсорбированного слоя, усталостные параметры.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России (ФИЦ ХФ РАН тема № 122040400099-5).

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Горбатова В.Н., Гордеева И.В., Дударева Т.В., Красоткина И.А. Влияние адгезионной добавки и природы наполнителя на межфазное взаимодействие и усталостные параметры асфальтовых вяжущих // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 415–430. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-415-430>. – EDN: KQNYDX.

### ВВЕДЕНИЕ

Межфазное взаимодействие между битумом и каменными материалами асфальтобетонной смеси (щебень разных фракций, песок и тонкодисперсный наполнитель) во многом определяет эксплуатационные характеристики и срок службы всего дорожного покрытия. При приготовлении ас-

фальтобетонной смеси сразу же за процессом смазывания поверхности каменных материалов происходит избирательная адсорбция компонентов битума. Активность адсорбции определяется природой, дисперсностью и удельной поверхностью каменных материалов, химическим составом битума и широко применяемых для улучшения адгезии поверхностно-активных веществ, а состав адсорбированного

© Горбатова В.Н., Гордеева И.В., Дударева Т.В., Красоткина И.А., 2024



битума характеризуется повышенной, по сравнению с объемным битумом, концентрацией наиболее высокомолекулярных и полярных компонентов [1].

На протяжении многих десятилетий внимание исследователей направлено на разработку эффективных методов оценки адгезии битума с каменными материалами [2]. В последние годы активно исследуется взаимосвязь межфазного взаимодействия и реологических свойств асфальтовых вяжущих, состоящих из матричной фазы битума и тонкодисперсного наполнителя [3–6].

Используя модель эмульсии Palierne [7], которая была разработана для системы твердых частиц, диспергированных в вязкоупругой подложке, физико-химическое взаимодействие между битумом и наполнителем может быть описано параметром межфазного взаимодействия  $K-B-G^*$  через комплексные модули составляющих компонентов:

$$K-B-G^* = \frac{(G_c^*/G_m^*)-1}{(1.5+G_c^*/G_m^*)\times\varphi}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — объемная доля наполнителя;  $G_c^*$  и  $G_m^*$  — значения комплексного модуля для асфальтового вяжущего и матрицы (битумного вяжущего) в зависимости от частоты.

Одним из основных видов разрушений дорожных покрытий является образование усталостных трещин при так называемых средних температурах эксплуатации. Содержание асфальтового вяжущего в асфальтобетонной смеси составляет всего около 10–15%, однако при циклических нагрузках именно этот компонент может разрушаться в первую очередь и оказывать непосредственное влияние на усталостную долговечность покрытия.

Для оценки усталостных свойств битумных и асфальтовых вяжущих широко используется тест линейной амплитудной развертки (LAS) [8–9], выполняемый на реометре динамического сдвига. На первом этапе проведения испытаний по результатам частотной развертки в области LVE диапазона определяются вязкоупругие характеристики образца. На втором этапе, когда образец подвергается серии циклов колебательной нагрузки при увеличивающейся амплитуде деформации, определяются накопленные повреждения, что позволяет определить усталостные характеристики, приближенные к реальным условиям деформации битумного или асфальтового вяжущего в процессе эксплуатации дорожных покрытий [10].

Анализ усталостных свойств производят в соответствии с теорией VECD (система моделирования повреждений вязкоупругой сплошной среды — viscoelastic continuum damage), основанной на теории потенциала Schapery [11], где интенсивность накопления повреждений ( $D$ ) зависит от потенциальной

энергии ( $W$ ), которая связана с ростом повреждений и параметра  $\alpha$ , который определяется способностью данного материала накапливать повреждения:

$$dD/dt = -(\partial W/\partial D)^\alpha. \quad (2)$$

Основным элементом этой теории является построение зависимости, связывающей интенсивность накопления повреждений с функцией, характеризующей целостность материала при циклическом нагружении. Интенсивность накопления повреждений при определенном уровне разрушения, определяемом выбранным критерием разрушения, входит в определение коэффициента  $A$  в законе усталости для определения параметра усталостной долговечности  $N_f$ :

$$N_f = A \times (\gamma_{max})^{-B}, \quad (3)$$

где  $N_f$  — число циклов до разрушения,  $B = 2\alpha$  — характеризует неразрушенное состояние материала, определяют на основе экспериментальных данных LAS теста в первой его части при минимальной деформации. а  $\gamma_{max}$  — максимальная деформация при данной конструкции дорожного покрытия, которая принимается обычно как 2.5, 5 или 15% [12].

Расчет интенсивности накопления повреждений проводят по различным моделям теории VECD, основанным на энергии, которая определяет накопление повреждений [13–16]. В последнем стандарте AASHTO T391-20 [12], принятом в США, используется модель, основанная на рассеянной энергии деформации, где в качестве функции, характеризующей целостность материала, применяют модуль потерь:

$$W = \pi I_D \gamma_i^2 (G_i^* \sin \delta_i), \quad (4)$$

а накопление повреждений от времени испытаний определяется по формуле (5):

$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi I_D \gamma_i^2 (G_i^* \sin \delta_i - G_{i-1}^* \sin \delta_{i-1})]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (5)$$

где  $I_D$  — значение комплексного модуля  $G^*$  при деформации 1 %;  $\gamma_i$ ,  $G_i$ ,  $\delta_i$  и  $t_i$  — текущие значения деформации, комплексного модуля, фазового угла и времени в испытании линейной амплитудной развертки (вторая часть LAS теста).

Вторая, широко используемая модель расчета основана на энергии псевдодеформации, а в качестве функции целостности материала при циклических нагрузках используется псевдожесткость [17–18]:

$$W^R = \frac{1}{2} C \gamma_R^2, \quad (6)$$



где  $\gamma_R$  — псевдо деформация,  $C$  — целостность материала, определяемая как псевдожесткость по формуле (7):

$$C(t) = \frac{|G_i^*(t)|}{|G^*|_{in}}, \quad (7)$$

где  $|G^*|_{in}$  и  $|G_i^*(t)|$  — начальное (определяемое во второй точке) и текущее значения комплексного модуля, полученные во второй части LAS теста.

Интенсивность накопления повреждений в этом случае:

$$D(t) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{DMR}{2} (\gamma_p^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (8)$$

$$\gamma_p^R = \gamma_p \cdot |G^*|_{LVE}, \quad (9),$$

$$C = \frac{\tau_p}{\gamma_p^R \cdot DMR}, \quad (10)$$

где  $\gamma_p^R$  — псевдодеформация при  $\tau_p$ ,  $\alpha$  — параметр, характеризующий ненарушенное состояние образца (первая часть LAS теста),  $\gamma_p$  — деформация, определенная при  $\tau_p$  на кривой  $\tau(\gamma)$  в каждом цикле нагрузки, а DMR определяется как:

$$DMR = \frac{|G^*|_{in}}{|G^*|_{LVE}}, \quad (11)$$

где  $|G^*|_{LVE}$  — значение комплексного модуля, определенное в испытании частотной развертки (первой части LAS теста).

Для определения параметра  $B$  используют угол наклона зависимости логарифма модуля релаксации от времени ( $m$ ). Из-за трудностей, связанных с проведением релаксационного испытания, модуль

релаксации обычно получают с помощью методов преобразования или, упрощая, строят зависимости комплексного модуля или модуля упругости ( $G'$ ) от частоты. Отметим, что зависимость  $B$  от угла наклона  $m$  остается открытой. Для асфальтобетонных смесей обычно принимают  $B = 2\alpha$ , где  $\alpha = 1/m$ , тогда как для вяжущих применяется и эта формула, и формула  $\alpha = 1/(1+m)$  [12, 19].

В данной работе поставлена цель — исследовать влияние адгезионной добавки и природы минерального наполнителя на межфазное взаимодействие в асфальтовых вяжущих на основе дорожного битума БНД 100/130 и оценить влияние толщины адсорбированного слоя битума на параметры усталостной долговечности асфальтовых вяжущих.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Материалы

В работе были использованы:

- Битум нефтяной дорожный марки БНД 100/130 по ГОСТ 33133 [20]: глубина проникания иглы (пенетрация) при 25°C — 115 × 0,1 мм; температура размягчения по кольцу и шару — 46°C; температура хрупкости по Фраасу — минус 23°C. Групповой химический состав битума, определенный по методу жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением [21], представлен на рис. 1.

- Наполнители:

- минеральный порошок карбонатных пород марки МП-1 по ГОСТ Р 52129-2003 [22] (Н1);
- порошок, полученный механическим дроблением некарбонатных пород (габбро) (Н2).

Распределение частиц наполнителей по размерам исследовали методом лазерной дифракции частиц в жидком потоке. Измерения выполняли на приборе ANALYSETTE 22 NanoTec plus с использованием

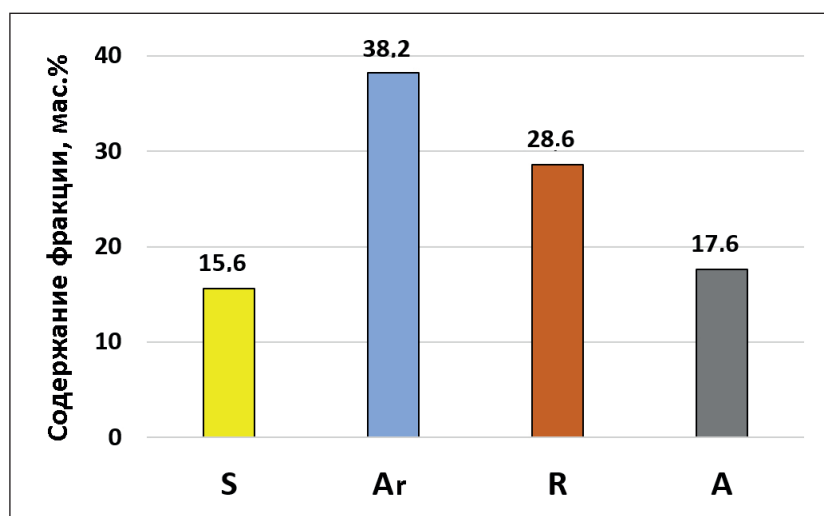


Рис. 1. Групповой химический состав битума: парафино-нафтеновые углеводороды (S), ароматические углеводороды (Ar), смолы (R), асфальтены (A)



программного обеспечения FRITSCH MaS control. Полученные результаты представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Удельную поверхность наполнителей определяли на приборе NOVA Series 1200e Quantachrome (USA) методом низкотемпературной адсорбции азота. Величину удельной поверхности и объем пор исследуемых образцов получали из анализа изотерм адсорбции-десорбции  $N_2$  при  $-196^\circ\text{C}$  (77K), измеренных в области равновесных относительных давлений паров ( $P/P_0$ ) от  $10^{-3}$  до 0,995. Образцы предварительно дегазировали при  $180^\circ\text{C}$  в течение 3 часов. Истинная плотность, удельная поверхность и значения параметров пористой структуры наполнителей, определенные по методу BET, представлены в табл. 1. Ошибка измерений не превышала 5–7%.

В соответствии с классификацией IUPAC [23] средний диаметр пор обоих наполнителей характерен для структуры с преобладанием мезопор. Полу-

ченные результаты показали, что наполнитель Н2 отличается от наполнителя Н1 большим размером частиц, большей истинной плотностью и меньшими значениями удельной поверхности, объема и размера пор.

### Адгезионная добавка

В качестве адгезионной добавки (АД) использовали поверхностно-активное вещество, применяемое в дорожном строительстве для улучшения сцепления нефтяного дорожного битума с каменными материалами как кислых, так и основных пород.

ИК спектр адгезионной добавки, полученный с использованием ИК-Фурье-спектрометра Thermo Scientific Nicolet iS50, приведен на рис. 3.

При изучении ИК-спектра адгезионной добавки отмечены хорошо выраженные пики  $2952$ ,  $2922$  и  $2852\text{ см}^{-1}$ , соответствующие  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$

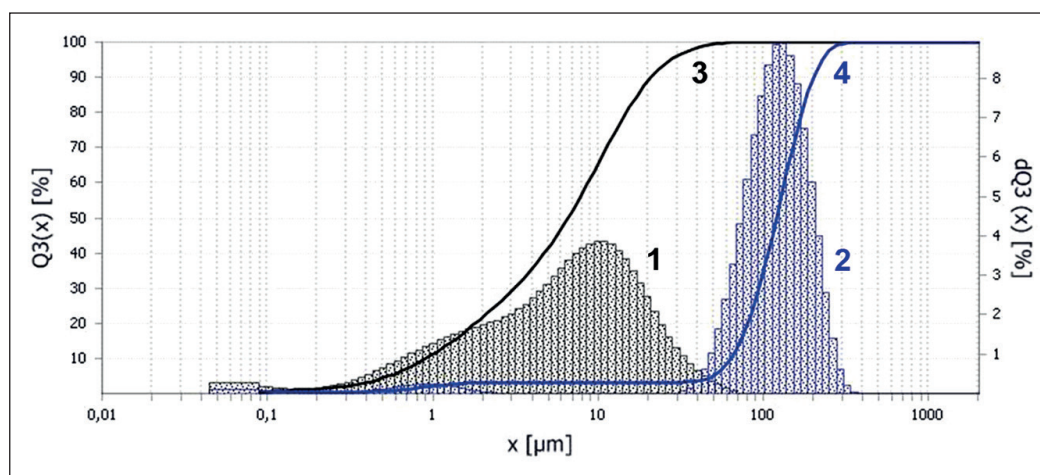


Рис. 2. Дифференциальная (1, 2) и интегральная (3, 4) кривые распределения частиц наполнителей по размерам: Н1 (1, 3), Н2 (2,4)

Таблица 1

Основные параметры наполнителей

Параметр		Наполнитель	
		Н1	Н2
Распределение по размерам	$D_{50}$ , мкм	7	120
	$D_{75}$ , мкм	13	160
	$D_{90}$ , мкм	21	201
Истинная плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>		2,71	3,05
Удельная поверхность, $S_{\text{BET}}$ , м <sup>2</sup> /г		4,214	1,437
Общий объем пор при относительном давлении $P/P_0 = 0,99$ , $V_t$ , см <sup>3</sup> /г		0,0106	0,002742
Средний диаметр пор, $D_{\text{пор}}$ , нм		10,1	7,63



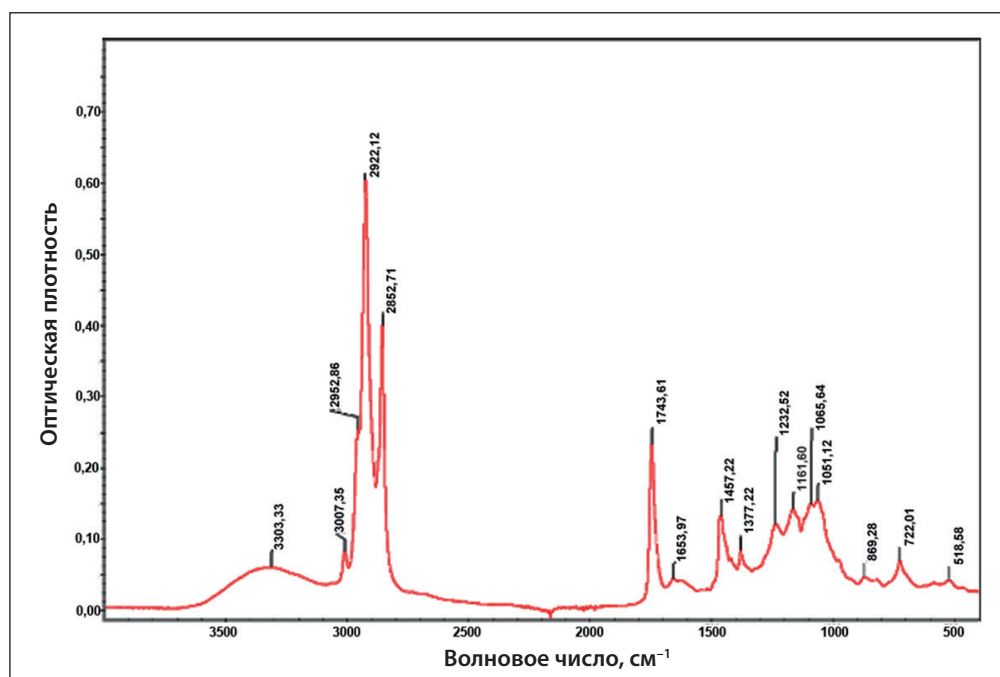


Рис. 3. ИК-спектр адгезионной добавки

и —СН-группам. Наличие более слабых по интенсивности пиков 1457 и 1377  $\text{см}^{-1}$  свидетельствует о значительном содержании в адгезионной добавке предельных и ароматических углеводородов (парафинов, масел и т.д.). Полоса поглощения в области 3005–3007  $\text{см}^{-1}$  образована валентными С–Н колебаниями, проявляющимися у ненасыщенных жирных кислот. Широкая полоса поглощения при 3300  $\text{см}^{-1}$  относится к валентным колебаниям О–Н связей фенола. Четко выражена полоса поглощения 1743  $\text{см}^{-1}$ , характеризующая карбонильные группы сложных эфиров насыщенных кислот. Полосы поглощения в области 1600–1560  $\text{см}^{-1}$  характерны для функциональных групп С=О аминокислот. Пик при волновом числе 1065  $\text{см}^{-1}$  относится к валентным колебаниям С–N связей.

#### Приготовление образцов для проведения реологических испытаний

Известно, что термоистория образцов, размер пластин, толщина зазора между пластинами реометра и т.д. могут влиять на результаты измерений реологических свойств [24]. Поэтому все образцы для реологических испытаний готовили и испытывали в одинаковых условиях.

Образец Б представлял собой битум БНД 100/130, подвергнутый нагреву до 160°C и перемешиванию при этой температуре в течение 3 минут при скорости вращения мешалки 600 об/мин.

Образец Б-АД готовили аналогичным образом, добавляя адгезионную добавку в количестве 0,7 мас.% в битум перед его разогревом.

Асфальтовые вяжущие АВ1 и АВ2 получали смешением при 160°C предварительно нагретого до этой температуры битума БНД 100/130 (Б) и наполнителя (Н1 и Н2, соответственно) в течение 3 минут при скорости вращения мешалки 600 об/мин. Массу наполнителей подбирали с учетом истинной плотности так, чтобы объемная доля ( $\Phi$ ) наполнителей в АВ была одинаковой и составляла 0,275.

При приготовлении образцов асфальтовых вяжущих АВ1-АД и АВ2-АД, содержащих адгезионную добавку и наполнитель Н1 и Н2, соответственно, АД предварительно вводили в битум перед его разогревом в количестве 0,7 мас.%.

Для исключения процедуры повторного разогрева образцы сразу же после приготовления разливали в силиконовые формы диаметром 8 мм, выдерживали сутки при комнатной температуре и затем использовали для реологических испытаний.

#### Методы испытаний

Реологические испытания выполняли на реометре динамического сдвига «MCR 702e» («Anton Paar») с параллельной геометрией пластин диаметром 8 мм. Измерительный зазор составлял 2 мм. Образцы извлекали из силиконовых форм и укладывали между пластинами реометра, нагретыми до 64°C. Обрезку образцов производили при этой же температуре. Расхождение измеряемых параметров от среднего значения не превышало 3–7%.

Для оценки межфазного взаимодействия выполняли частотную развертку в диапазоне частот от 0,1 до 100 рад/с при деформации ( $\gamma$ ) 0,05% при темпе-



ратурах от 30 до  $-10^{\circ}\text{C}$  с шагом  $10^{\circ}\text{C}$ . Деформация 0,05% была выбрана, т.к. она находится в LVE диапазоне для всех образцов при  $-10^{\circ}\text{C}$  (минимальное значение наблюдалось для АВ и составляло 0,15%). Использовали один образец, который термостатировали после достижения заданной температуры испытаний в течение 10 минут.

Параметр  $K-B-G^*$ , характеризующий физико-химическое взаимодействие между минеральным порошком и битумом, через комплексный модуль определяли по формуле (1). При определении отношения комплексных модулей асфальтового вяжущего к матрице ( $G^*/G_m^*$ ) для АВ1 и АВ2 в качестве матрицы использовали данные для битума, а для АВ1-АД и АВ2-АД – для битума с адгезионной добавкой (Б-АД).

Толщину адсорбированного слоя ( $d$ ) определяли по формуле (12):

$$d = \frac{\varphi_{eff} - \varphi}{\varphi \cdot \rho \cdot s}, \quad (12)$$

где  $\varphi_{eff} = \varphi \cdot (K-B-G^*)$  – эффективная объемная доля наполнителя, т.е. наполнитель вместе со слоем адсорбированного битума,  $\varphi$  – объемная доля наполнителя;  $\rho$  – плотность наполнителя,  $s$  – удельная поверхность наполнителя.

Усталостные испытания по методу линейной амплитудной развертки (LAS в соответствии с [12]) выполняли в диапазоне температур от 16 до  $1^{\circ}\text{C}$  с шагом  $3^{\circ}\text{C}$ . Верхнюю температуру диапазона испытаний выбирали так, чтобы начальное значение модуля потерь ( $G^* \sin \delta$ ) битума или битума с адгезионной добавкой превышало 5–6 МПа. Для каждой темпе-

ратуры использовали новый образец. Первая часть испытаний выполнялась в режиме частотной развертки ( $\omega = 0,2\text{--}30$  Гц при деформации 0,1%). Далее, используя тот же образец, вторая часть испытаний выполнялась в режиме ступенчатой линейной амплитудной развертки при частоте 10 Гц в диапазоне деформаций 0,1%; 1% и далее с шагом 1% до 30% (по 100 циклов при каждом значении деформации, всего 3100 циклов).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Межфазное взаимодействие и толщина адсорбированного слоя в асфальтовых вяжущих

На первом этапе работы методом частотной развертки было исследовано межфазное взаимодействие по параметру  $K-B-G^*$  в асфальтовых вяжущих без адгезионной добавки (АВ1 и АВ2) и в ее присутствии (АВ1-АД, АВ2-АД). Особенностью испытаний было то, что один образец использовался для последовательных измерений при пяти температурах, начиная от  $30^{\circ}\text{C}$  и до  $-10^{\circ}\text{C}$  с шагом  $10^{\circ}\text{C}$  и с термостатированием образца при каждой температуре.

Как можно видеть на рис. 4, при одинаковой объемной доле наполнителя (0,275) большее значение параметра  $K-B-G^*$  как без адгезионной добавки, так и в ее присутствии наблюдалось для образца АВ1, т.е. при использовании в качестве наполнителя минерального порошка карбонатных пород Н1.

Параметр  $K-B-G^*$  асфальтового вяжущего АВ2 на основе наполнителя порошка некарбонатных пород (габбро) Н2 оказался более чувствителен к веде-

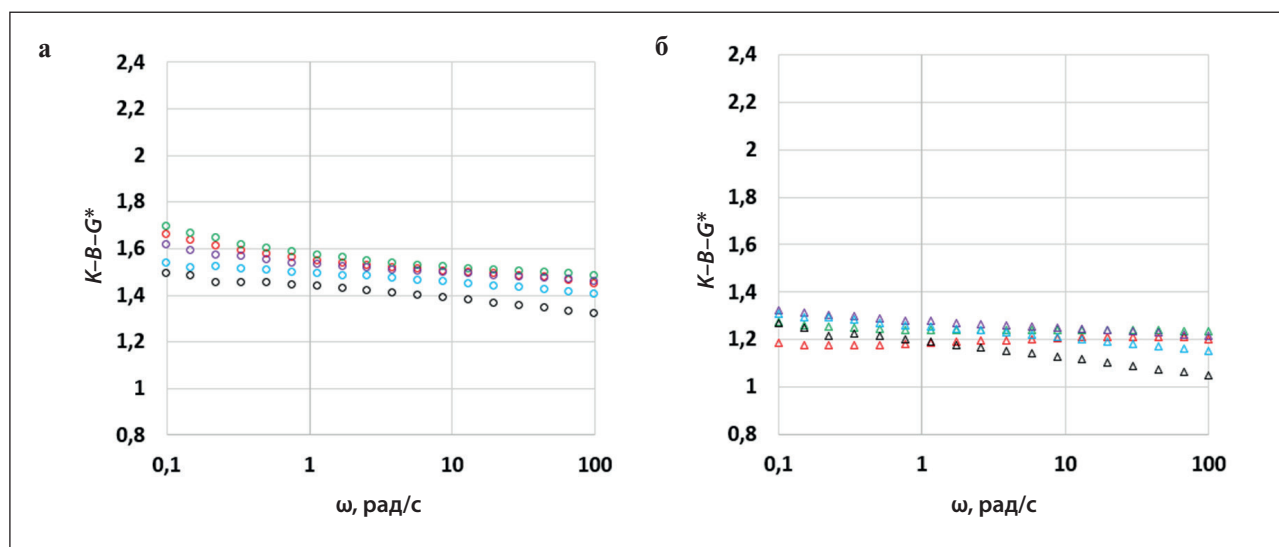


Рис. 4. Графики зависимости параметра межфазного взаимодействия  $K-B-G^*$  от частоты испытаний ( $\omega$ ) для образцов: АВ1 (а), АВ2 (б), АВ1-АД (в), АВ2-АД (г) при температурах 30 (красный), 20 (зеленый), 10 (лиловый), 0 (голубой) и  $-10^{\circ}\text{C}$  (черный)



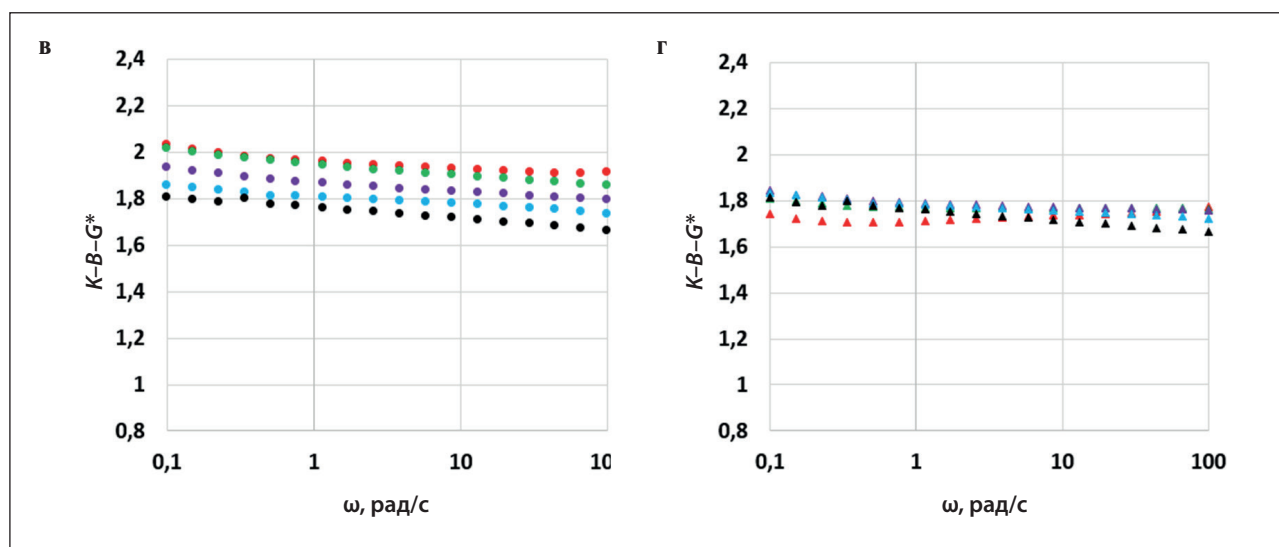


Рис. 4. Окончание

нию адгезионной добавки. При этом чувствительность к воздействию температуры и частоты для образца АВ2-АД была меньше, чем для образца АВ1-АД.

На рис. 5 для всех асфальтовых вяжущих представлены графики зависимости толщины адсорбированного слоя ( $d$ ) от температуры и частоты испытаний. Толщина слоя в образцах, не содержащих адгезионную добавку, составляет от 60 до 30 нм для АВ1 и от 75 до 10 нм для АВ2 (см. рис. 5а и 5б).

Введение в асфальтовые вяжущие адгезионной добавки (АД) в обоих случаях увеличивает  $d$  (см. рис. 5 в и 5 г). Этот эффект проявлен в меньшей степени для образца АВ1-АД, в состав которого

входит наполнитель Н1. При этом можно отметить тенденцию к увеличению зависимости толщины адсорбированного слоя от температуры по сравнению с образцом АВ1 без адгезионной добавки. Для АВ2-АД на основе Н2 можно отметить увеличение по сравнению с АВ2 толщины межфазного слоя более чем в 2 раза (до 190–150 нм).

#### Усталостные испытания

Область температур испытаний, где механизм разрушения определяется усталостными свойствами материала без влияния текучести и потери адге-

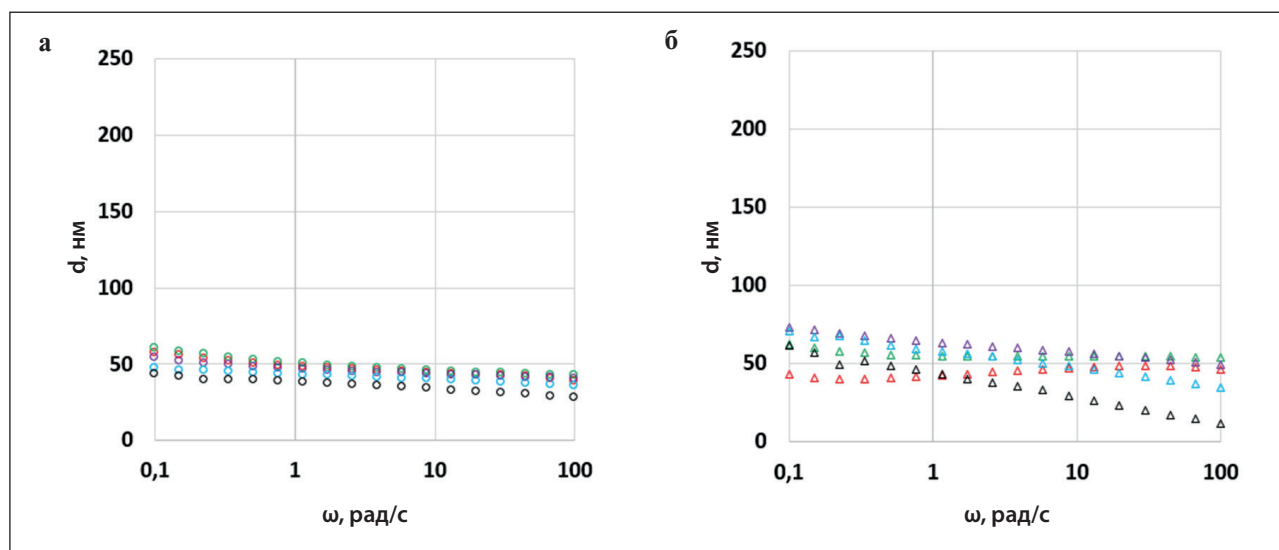


Рис. 5. Графики зависимости толщины адсорбированного слоя  $d$  от частоты испытаний ( $\omega$ ) для образцов: АВ1 (а), АВ2 (б), АВ1-АД (в), АВ2-АД (г) при температурах 30 (красный), 20 (зеленый), 10 (лиловый), 0 (голубой) и  $-10^{\circ}\text{C}$  (черный)



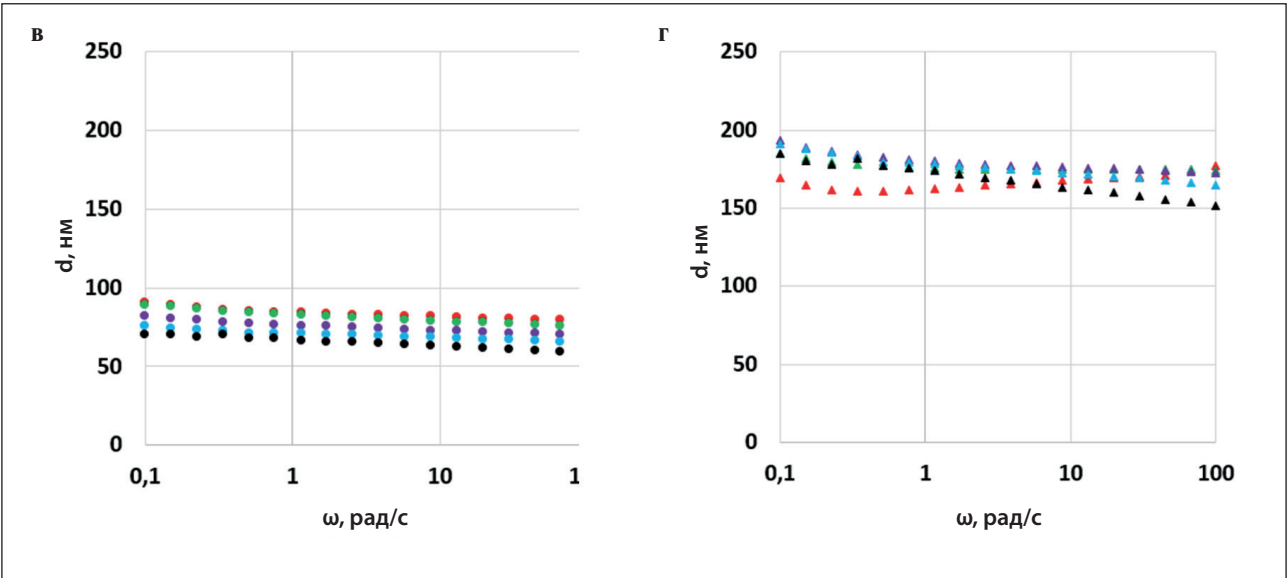


Рис. 5. Окончание

зии, рекомендовано выбирать таким образом, чтобы комплексный модуль сдвига находился в диапазоне от 12 до 60 МПа [25]. В табл. 2 приведены зависимости параметров  $G^*$  ( $I_D$ ) и  $G^* \sin \delta$  ( $C_0$ ) от температуры испытаний. В соответствии с общепринятым подходом,  $I_D$  определяли как начальное значение комплексного модуля  $G^*$  при деформации 1 %; а  $C_0$  как среднее значение  $G^* \sin \delta$  при деформации 0,1 %.

Как можно видеть из табл. 2, для образца битума (Б)  $C_0$  при температуре 16°C составляет 6,6 МПа, что довольно близко к значениям, характеризующим

не усталостное поведение, а пластическое течение в процессе испытаний. Из приведенных данных также можно видеть, что введение наполнителей в битум привело к увеличению  $I_D$  и эквижесткие (или близкие к ним) образцы наблюдаются при испытаниях на 6 градусов выше. Введение адгезионной добавки в битум и АВ снизило значение  $I_D$  образцов, и эквижесткие образцы наблюдаются во всех случаях при испытаниях на 3 градуса ниже.

Так, например, значения параметра  $I_D$ , близкие к 22 и 32 МПа, соответствуют температурам испыта-

Таблица 2  
Зависимости параметров  $I_D$  и  $C_0$  от температуры испытаний

Параметр		Образец					
		Б	Б-АД	АВ1	АВ1-АД	АВ2	АВ2-АД
$I_D$ , МПа							
Температура, °C	16	10,2		22,1		21,4	
	13	14,5		33,8	24,8	35,8	19,6
	10	22,1	12,3	53	29,4	48	31
	7	31,7	20,2	61,8	50,6	59,5	43,5
	4	42,1	31,6		76,2		63,8
$C_0$ , МПа							
Температура, °C	16	6,6		15,9		15,7	
	13	9,0		22,9	16,3	24,7	13,5
	10	12,6	7,4	32,5	17,9	29,1	20,0
	7	16,8	11,0	35,5	30,9	36,6	26,0
	4	21,4	16,5		40,7		36,7

Примечание: тонировка ячеек выполнена для двух групп эквижестких (или близких к ним) образцов.



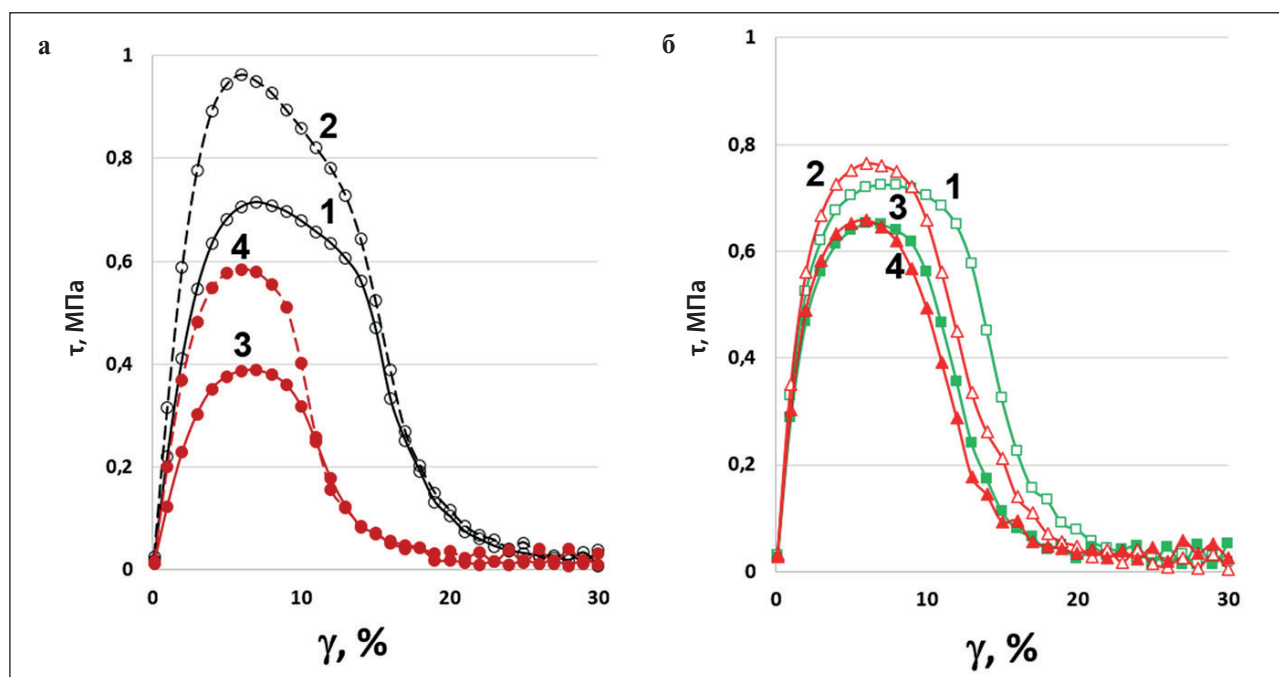


Рис. 6. Зависимость напряжения сдвига ( $\tau$ ) от деформации ( $\gamma$ ) для образцов: а) битум (1, 2) и Б-АД (3, 4) при температурах 10 (1, 3) и 7°C (2, 4); б) для АВ1 (1) и АВ2 (2) при 13°C и АВ1-АД (3) и АВ2-АД (4) при 10°C

ний 10 и 7°C для битума, 7 и 4°C для Б-АД, 16 и 13°C для АВ1 и АВ2, 13 и 10°C для АВ1-АД и АВ2-АД. Вместе с тем, как можно видеть на рис. 6, где приведены графики зависимости напряжения сдвига ( $\tau$ ) от деформации ( $\gamma$ ), в процессе усталостных испытаний поведение экижестких образцов с адгезионной добавкой и без нее существенно различается.

Так, на рис. 6а экижестким образцам соответствуют кривые 1 (битум, при 10°C) и 4 (битум с адгезионной добавкой при 7°C). Снижение температуры испытаний для образцов Б и Б-АД приводит к увеличению максимального напряжения сдвига и уменьшению соответствующей ему деформации. При этом введение в битум адгезионной добавки снижает максимальное напряжение сдвига, что должно положительно сказываться на усталостной долговечности, но изменяет поведение постпикового участка кривой, что, по-видимому, может отражать более быстрое разрушение образца в процессе испытаний. Аналогичную тенденцию более резкого снижения  $\tau$  после прохождения максимума можно проследить, сравнивая кривые  $\tau(\gamma)$  экижестких образцов АВ и АВ-АД (рис. 6б).

Для характеристики усталостной долговечности в теории VECD анализируется кривая зависимости накопления повреждений от деформации (Damage Curve), отражающая потерю структурной целостности материала при циклическом нагружении. На рис. 7 представлены Damage Curve, представляющие собой зависимость отношения параметра  $C$  (текущего мо-

дуля потерь ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) в модели рассеянной энергии деформации (см. рис. 7а и 7б) и комплексного модуля ( $G^*$ ) в модели энергии псевдодеформации (см. рис. 7в и 7г) к его начальному значению  $C_0$  от интенсивности накопления повреждения (Damage Intensity). Анализируя представленные данные, следует помнить, что значение  $C/C_0 = 1$  соответствует деформации  $\gamma = 0,1\%$ , а минимальное значение  $C/C_0$  для каждой кривой фиксируется при  $\gamma = 30\%$ . Появление зубцов, возможно, связано с особенностями расчета Damage Intensity по различным моделям и краевыми эффектами при больших деформациях сдвига.

Как можно видеть из рис. 7а и 7в, при температуре 16°C наименьшее накопление повреждений по обоим расчетным моделям проявляет битум, в то время как для образцов асфальтовых вяжущих при расчете по методу энергии псевдодеформации практически отсутствует разница между кривыми. При понижении температуры (см. рис. 7б, 7г и рис. 8), а также при введении адгезионной добавки (рис. 8) проявляется преимущество образца АВ2, что может быть связано с большей толщиной адсорбированного слоя.

Следует обратить внимание на то, что при температуре 7°C ухудшается устойчивость к разрушению образца битума без адгезионной добавки (рис. 8а, в), так что кривая битума оказывается близка к кривой АВ2. Учитывая высокое (15,6%) содержание парафино-нафтеновых углеводородов в битуме (см. рис. 1), можно предположить протекание в этом



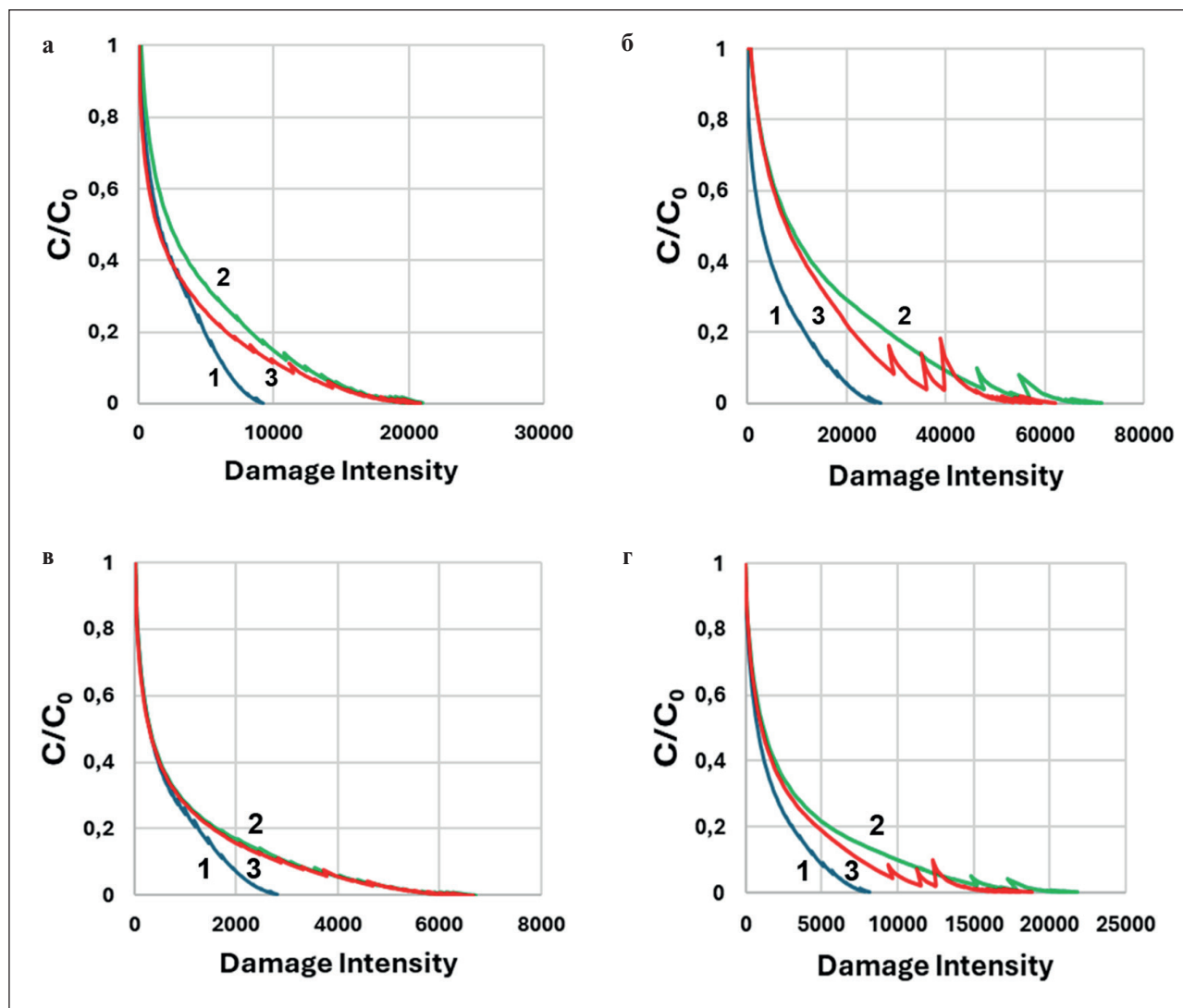


Рис. 7. Зависимость  $C/C_0$  от Damage Intensity: (а) при температуре 16°C (а, в) и 10°C (б, г) для образцов: Б (1) АВ1 (2), АВ2 (3) по моделям рассеянной энергии деформации (а, б) и энергии псевдодеформации (в, г)

температурном диапазоне процессов структурирования, связанных с кристаллизацией (плавлением) н-алканов (парафинов) [25]. Структурирование битума приводит к появлению новых границ раздела, по которым также может происходить зарождение микротрещин. Добавление адгезионной добавки, по-видимому, сдвигает структурирование битума в область более низких температур, и при температуре 7°C (рис. 8б и 8г) битум с адгезионной добавкой опять имеет преимущество перед асфальтовыми вяжущими с той же АД.

На рис. 9 представлены кривые зависимости интенсивности накопления повреждений от температуры. Расчет проводили по модели рассеянной энергии деформации и двух вариантов критерия отказа (разрушения, failure) –  $C/C_0 = 0,65$  [12] и  $C/C_0$  при  $\tau_{max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$  в тесте амплитудной развертки. Па-

раметр  $\alpha$ , входящий в расчет Damage Intensity, определяли двумя способами как  $\alpha = 1 + 1/m$  и  $\alpha = 1/m$ .

Аналогичные кривые, полученные по модели энергии псевдодеформации для критерия отказа  $C/C_0$  при  $\tau_{max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$  и двух вариантах определения параметра  $\alpha$ , представлены на рис. 10.

Для всех вариантов расчетов, критериев разрушения и вариантов определения параметра  $\alpha$  можно отметить общие тенденции, заключающиеся в том, что при одной температуре ранжирование образцов в порядке убывания накопленных повреждений (Damage Intensity) выглядит следующим образом: АВ1, АВ2, АВ1-АД, АВ2-АД. Сопоставляя данные, приведенные на рис. 9–10 и рис. 5 и 7–8, можно проследить определенную корреляцию между толщиной адсорбированного слоя ( $d$ ) и Damage Intensity: увеличение  $d$  приводит к снижению Damage Intensity.



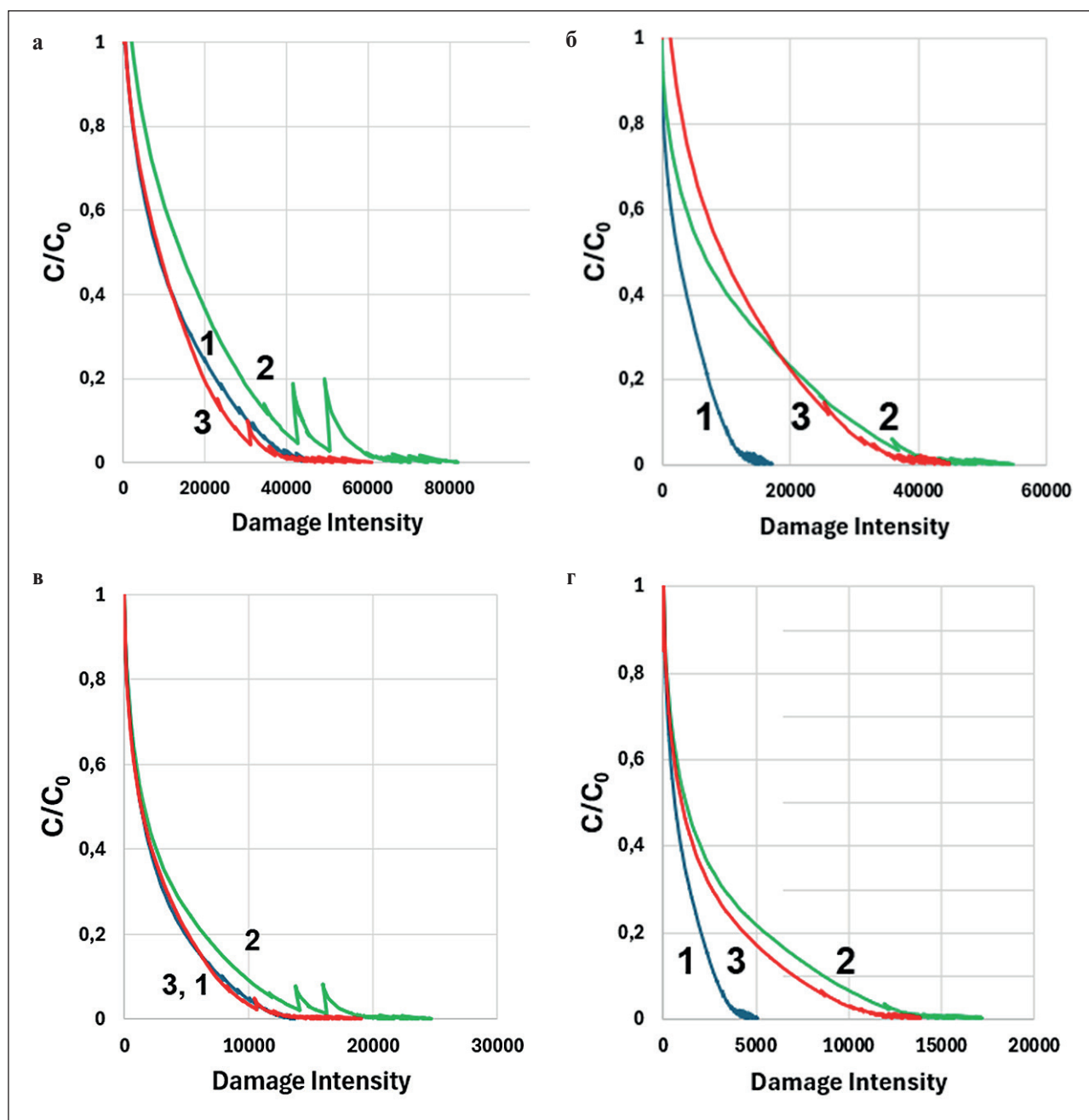


Рис. 8. Зависимость  $C/C_0$  от Damage Intensity: (а) при температуре  $7^\circ\text{C}$  для образцов без АД (а, в) и с АД (б, г): Б (1) АВ1 (2), АВ2 (3) по моделям I (а, б) и II (в, г)

К сожалению, применение моделей расчета для параметра  $N_f$  не дало однозначного результата. На рис. 11 для образцов асфальтовых вяжущих представлена зависимость от температуры параметра числа циклов до разрушения ( $N_f$ ) для деформаций 2,5, 5 и 15% при расчете по модели рассеянной энергии деформации при  $\alpha = 1+1/m$  и  $\alpha = 1/m$  и критерию разрушения (отказа, failure) при  $\tau_{\max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$ . Для всех образцов  $N_f$  уменьшается при понижении температуры. В отсутствии адгезионной добавки зна-

чения  $N_f$  для образца АВ1 близки к битуму (кривая не приводится) и превышают значения  $N_f$  для образца АВ2. Добавление адгезионной добавки несколько снижает  $N_f$  битума (кривая не приводится) и АВ1, в то время как для АВ2 наблюдается увеличение усталостной долговечности независимо от того, по какой формуле производится расчет параметра  $\alpha$ .

Графики зависимости  $N_f$  от температуры при расчете по модели энергии псевдодеформации для образцов без адгезионной добавки носят тот же ха-



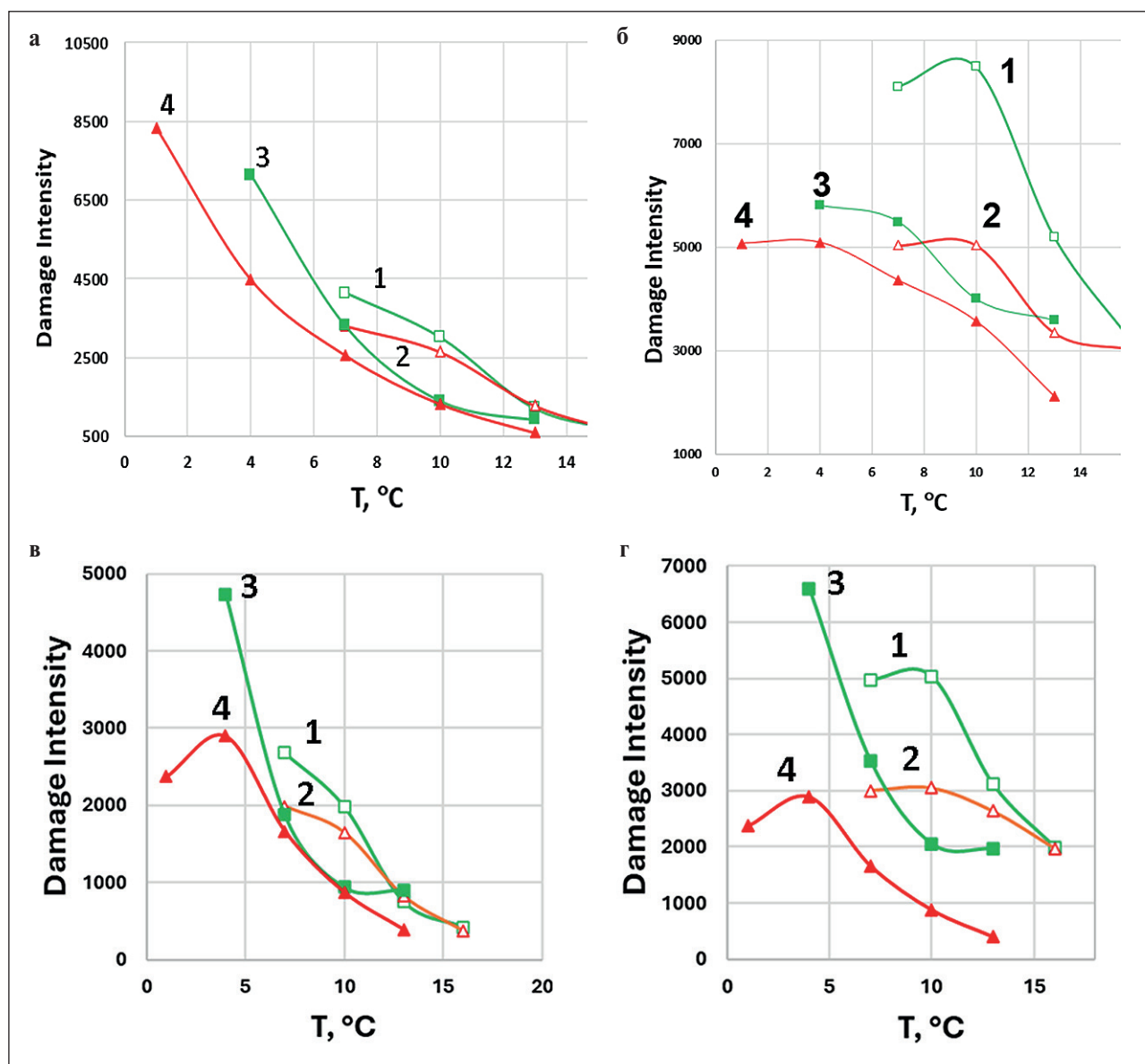


Рис. 9. Зависимость накопления разрушений (Damage Intensity) от температуры при расчете по модели рассеянной энергии деформации при  $\alpha = 1 + 1/m$  (а, б) и  $\alpha = 1/m$  (в, г) и при критериях разрушения:  $C/C_0 = 0,65$  (а, в),  $C/C_0$  при  $t_{max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$  (б, г) для образцов АВ1 (1), АВ2 (2), АВ1-АД (3), АВ2-АД (4)

рактически отсутствует, независимо от способа расчета параметра  $\alpha$ . Образец АВ2-АД демонстрирует несколько большую усталостную долговечность по сравнению с АД1. А вот кривая  $N_f(T)$  образца битума с адгезионной добавкой возрастает при понижении температуры (кривая не приводится), что вызывает сомнение в применимости данного метода расчета для прогнозирования усталостной долговечности в таких образцах.

Таким образом, удалось проследить только некоторые тенденции влияния толщины адсорбированного слоя в асфальтовых вяжущих и асфальтовых

вяжущих, содержащих адгезионную добавку, на накопление повреждений (Damage Intensity), но не на параметр усталостной долговечности  $N_f$ .

Интересную закономерность удалось проследить по параметру  $F$ , который фактически характеризует скорость нарастания энергии псевдодеформации. Ранее было показано, что более низкое значение параметра  $F$  связано с более высокой усталостной долговечностью образца [26]. Как можно видеть на рис. 12, введение наполнителя Н2 приводит к более сильному ухудшению усталостной долговечности битума по сравнению с Н1. Введение адгезионной добавки приводит к снижению величины  $F$  для ас-



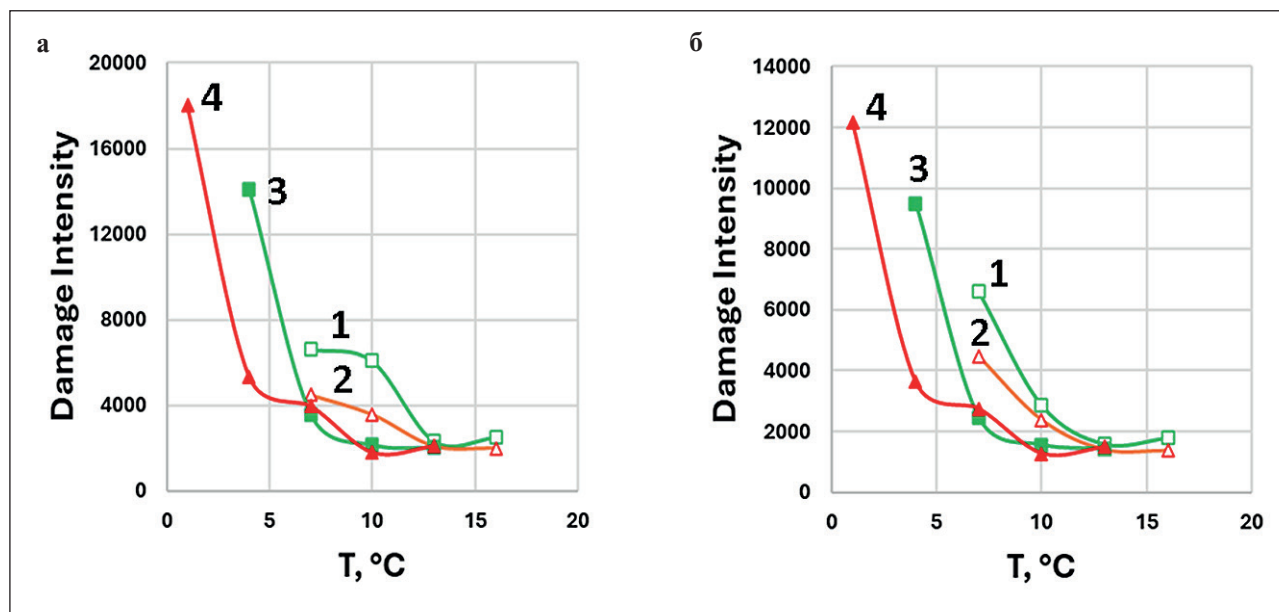


Рис. 10. Зависимость накопления разрушений (Damage Intensity) от температуры при расчете по модели энергии псевдодеформации при  $\alpha = 1+1/m$  (а) и  $\alpha = 1/m$  (б) и критерию разрушения (отказа)  $C/C_0$  при  $\tau_{\max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$  для образцов АВ1 (1), АВ2 (2), АВ1-АД (3), АВ2-АД (4)

фальтовых вяжущих, т.е. увеличивает их усталостную долговечность, причем это увеличение больше проявлено для АВ с наполнителем Н2, у которого толщина адсорбированного слоя выше. Следует отметить, что для битума влияние адгезионной добавки на этот параметр практически отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были использованы стандартный минеральный порошок карбонатных пород (Н1) и наполнитель некарбонатных (габбро) пород (Н2), отличавшийся от Н1 большим размером частиц, боль-

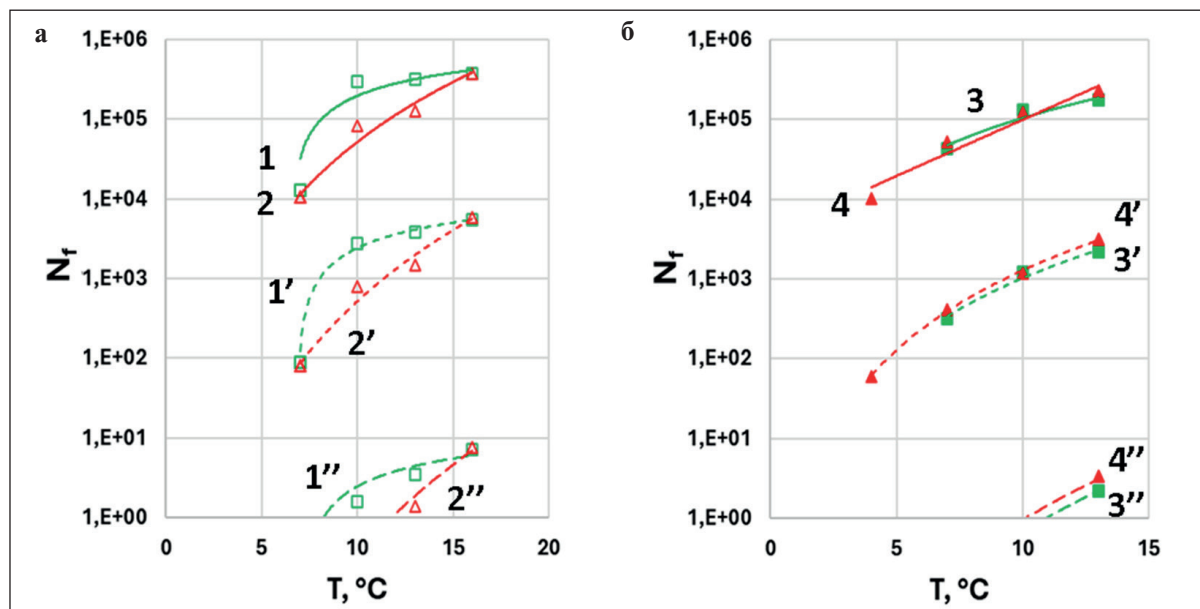


Рис. 11. Зависимость числа циклов до разрушения ( $N_f$ ) при расчете по модели рассеянной энергии деформации при  $\alpha = 1+1/m$  (а, б) и  $\alpha = 1/m$  (в, г) и по модели энергии псевдодеформации при  $\alpha = 1+1/m$  (д, е) и  $\alpha = 1/m$  (ж, з) при критерии разрушения (отказа, failure)  $\tau_{\max}$  на кривой  $\tau(\gamma)$  для образцов АВ1 (1), АВ2 (2); АВ1-АД (3), АВ2-АД (4) при деформациях 2,5% (1–4), 5% (1'–4') и 15% (1''–4'')



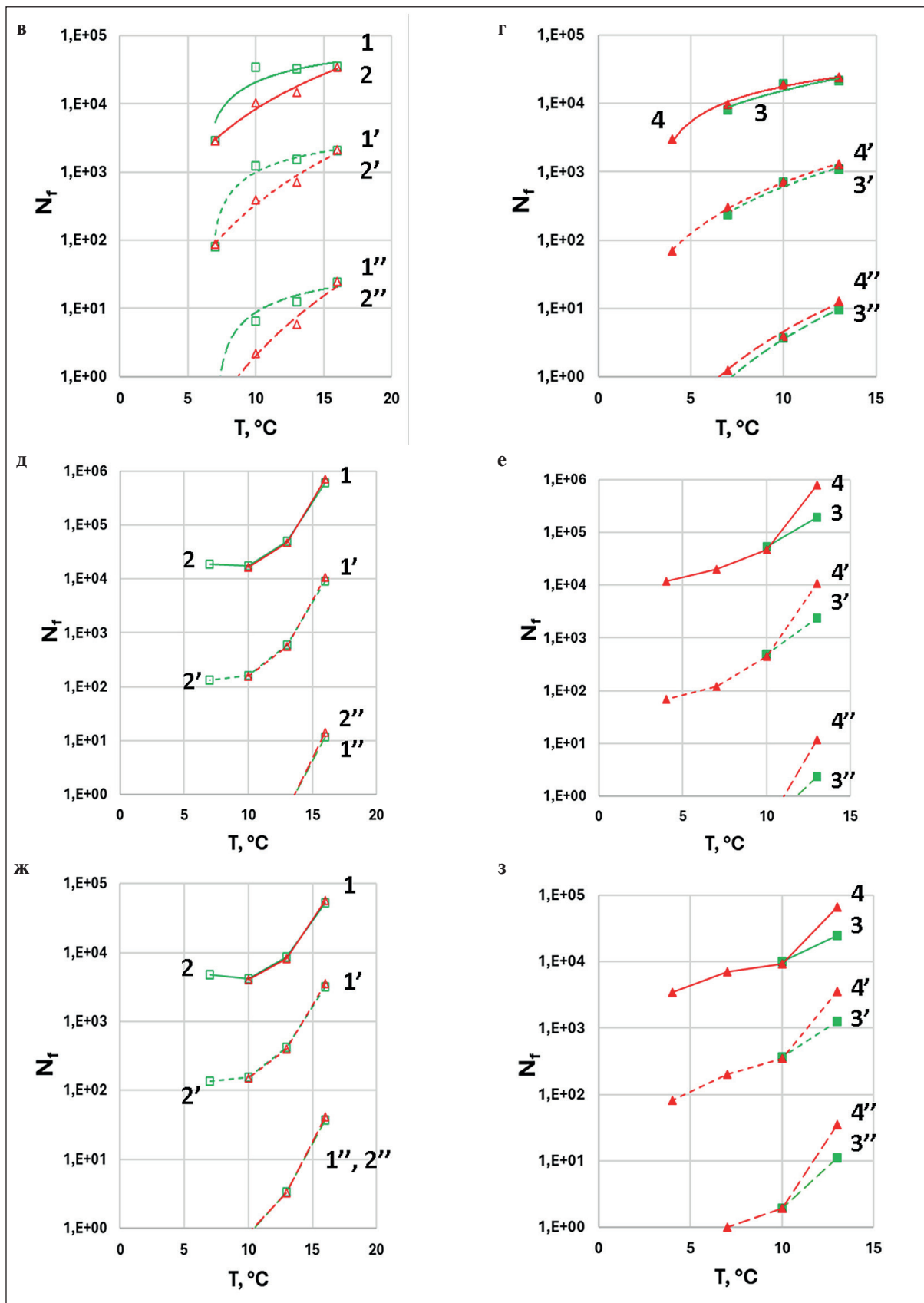


Рис. 11. Окончание



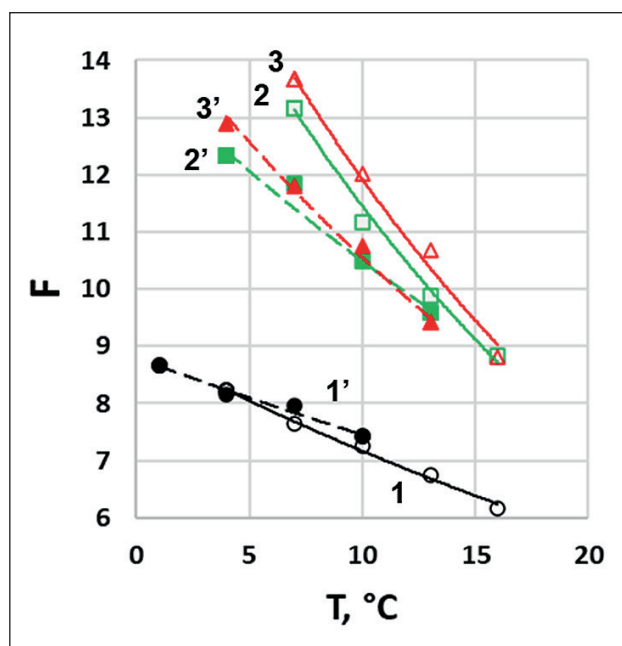


Рис. 12. Зависимость параметра  $F$  от температуры для образцов: битум (1), АВ1 (2), АВ2 (3); Б-АД (1'), АВ1-АД (2'), АВ2-АД (3')

шей истинной плотностью и меньшими значениями удельной поверхности, объема и размера пор. При одинаковой объемной доле наполнителя (0.275) в асфальтовых вяжущих на основе битума БНД 100/130 большее значение параметра  $K-B-G^*$  как без адгезионной добавки, так и в ее присутствии наблюдалось для образца асфальтового вяжущего (АВ) на основе наполнителя Н1. Введение адгезионной добавки в асфальтовое вяжущее на основе напол-

нителя Н2 привело к большему, по сравнению с АВ на основе Н1, росту параметра  $K-B-G^*$ , снижению его чувствительности к воздействию температуры и частоты испытаний. Толщина адсорбированного слоя при применении адгезионной добавки (АД) существенно увеличивается в асфальтовом вяжущем с наполнителем Н2.

Для оценки усталостной долговечности по результатам LAS теста были использованы различные модели VECD теории, критерии разрушения и варианты параметра неразрушенной структуры  $\alpha$ . Для всех вариантов расчетов наблюдаются тенденции сохранения ранжирования образцов по устойчивости к накоплению повреждений (Damage Intensity) при одной температуре:  $AB1 < AB2 < AB1-AD < AB2-AD$ . Увеличение толщины межфазного слоя ( $d$ ) приводит к снижению Damage Intensity. Однозначных данных по зависимости параметра усталостной долговечности — числа циклов до разрушения ( $N_f$ ) от температуры — получить не удалось. Показано, что увеличение толщины адсорбционного (межфазного) слоя приводит к улучшению усталостной долговечности, определяемой по усталостному критерию  $F$ .

Работа будет продолжена с расширением круга исследуемых объектов: битумов, наполнителей и адгезионных добавок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колбановская А.С., Михайлов В.В. *Дорожные битумы*. Москва: Транспорт, 1973. 261 с.
2. Пыриг Я.И. A review of methods for evaluating the adhesion of bitumen to stone materials // *Вісник ХНАДУ*. 2019. 85:73–85. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.73>
3. Cardone F., Frigio F., Ferrotti G., Canestrar F. Influence of mineral fillers on the rheological response of polymer-modified bitumens and mastics // *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition). 2015; 2(6):373–381. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.06.003>
4. Chen M., Javilla B., Hong W., Pan C., Riara M., Mo L. Rheological and Interaction Analysis of Asphalt Binder, Mastic and Mortar // *Materials*. 2019; 12 (1):128. <https://doi.org/10.3390/ma12010128>
5. Guo M., Tan Y. Interaction between asphalt and mineral fillers and its correlation to mastics' viscoelasticity // *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(1):1–10. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1575379>
6. Guo M., Bhasin A., Tan Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder // *Construction and Building Materials*. 2017; 141:152–159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.051>
7. Palierne J.F. Linear rheology of viscoelastic emulsions with interfacial-tension // *Rheologica Acta*. 1990; 29(3):204–214.
8. Hintz C., Velasquez R., Johnson C., Bahia H. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2207:99–106. <https://doi.org/10.3141/2207-13>
9. Riccardi C., Falchetto A.C., Wistuba M.P. Comparison of fatigue test methods on asphalt mastic. In book: *Functional Pavement Design. Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design*. 2016. ISBN 9781138029248.
10. Christensen D.W., Tran N. Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures. *NCHRP RESEARCH REPORT 982*. 2022. Washington, DC. ISBN 978-0-309-09342-2. <https://doi.org/10.17226/26302>



11. Schapery R. A. A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990; 38(2):215–253. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(90\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0022-5096(90)90035-3)
12. AASHTO T391-20. Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, DC: AASHTO
13. Cao W., Wang W. New comprehensive analysis framework for fatigue characterization of asphalt binder using the Linear Amplitude Sweep test // *Construction and Building Materials*. 2018; 171:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.125>
14. Zhang H., Shen K., Xu G., Tong J., Wang R., Cai D., Chen X. Fatigue resistance of aged asphalt binders: An investigation of different analytical methods in linear amplitude sweep test // *Construction and Building Materials*. 2020; 241:118099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118099>
15. Safaei F., Castorena C., Kim Y.R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2016; 20:299–323. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9304-1>
16. Chen H., Bahia H.U. Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the LAS test // *International Journal of Fatigue*. 2021; 146:106150. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106150>
17. Wang C., Castorena C., Zhang J., Kim Y.R. Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading // *Road Materials and Pavement Design*. 2015; 16 (2):125–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077010>
18. Underwood B.S. A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2016; 82(3):387–401. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.020>
19. AASHTO TP101-14 Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
20. ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия
21. Методика измерений группового химического состава тяжелых нефтепродуктов методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением. Уфа: 2014. 18 с.
22. ГОСТ Р 52129-2003 Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия
23. International Union of Pure and Applied Chemistry Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids: “Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)” // *Pure and Applied Chemistry*. 1994; 66(8):1739–1758.
24. Sheidaei M., Gudmarsson A. Sample preparation techniques on dynamic shear rheometer testing: round robin tests on bitumen // *Road Materials and Pavement Design*. 2024; 25(3):474–491. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2213775>
25. Frolov I.N., Firsin A.A., Yusupova T.N., Okhotnikova E.S., Ziganshin M.A. Dynamics of formation of asphalt microstructure according to modulated differential scanning calorimetry data // *Petroleum Chemistry*. 2017; 57(12):1002–1006. <https://doi.org/10.1134/S0965544117120039>
26. Zhang J., Sabouri M., Guddati M., Kim Y. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading // *Road Materials and Pavement Design*. 2013; 14(2):1–15. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812843>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горбатова Виктория Николаевна** – младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия, vik21477677@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1592-345X>

**Гордеева Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия, ivgordeeva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9879-3701>

**Дударева Татьяна Владимировна** – старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия, yanadva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9698-8591>

**Красоткина Ирина Александровна** – старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия, vadnik29@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1047-079X>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Горбатова В.Н.** – проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных.

**Гордеева И.В.** – литературный обзор; графическое и табличное представление результатов исследования.

**Дударева Т.В.** – обработка и анализ экспериментальных данных; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

**Красоткина И.А.** – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024; одобрена после рецензирования 30.09.2024; принята к публикации 07.10.2024.



# Advancing Decision-Making: The Role of Management Analytics in Modern Business Practices

Y. Lu<sup>1\*</sup> , Zhanna V. Pisarenko<sup>2</sup> , Lei Yang<sup>3</sup> , Leonid A. Ivanov<sup>4</sup> , Chengang Ye<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Beijing Technology and Business University, Beijing, China

<sup>2</sup> Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Shenyang University of Technology, Shenyang, China

<sup>4</sup> Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

<sup>5</sup> University of International Business and Economics, Beijing, China

\* Corresponding author: e-mail: ziyuu@gmail.com

## ABSTRACT

**Introduction.** Management analytics is an evolving field that has gained substantial traction in both academia and industry due to its profound impact on decision-making processes. The integration into decision making of advanced information technologies and AI drive innovative solutions within management analytics. **Evolution of Management Analytics.** The discipline integrates statistical analysis, predictive modeling, and data visualization to optimize business strategies, operational efficiency, and financial performance. As management practices advance, they contribute new dimensions to data collection and analysis, presenting unique opportunities to boost nanotechnologies. **Methodological Advances in Management Analytics.** This study explores the transformative effects of management analytics across diverse sectors by illustrating its evolution and interpreting its methodologies with special focus on nanotechnologies. **Applications in Different Sectors.** Management analytics significantly enhances decision-making through sophisticated data analysis, offering strategic insights that propel efficiency and competitiveness. The use of management analytics in nanotechnologies raises questions regarding ethical implications and regulatory considerations. **Challenges and Future Directions.** However, integration complexities, data security, and the need for skilled personnel pose ongoing challenges. **Conclusion.** This review provides insights into the potentials of the development of management analytics and its importance in contemporary management.

**KEYWORDS:** Management Analytics, decision making, data analytics, management science.

## FOR CITATION:

Lu Y., Pisarenko Zh.V., Yang L., Ivanov L.A., Ye C. Advancing Decision-Making: The Role of Management Analytics in Modern Business Practices. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(5): 431–440. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-431-440>. – EDN: MDCKFD

## INTRODUCTION

Management analytics encapsulates a comprehensive approach for understanding and leveraging data within the managerial contexts. It enables organizations to harness information assets to drive strategic decisions and achieve competitive advantage. In an era marked by digital transformation and an overwhelming volume of data, the ability to analyze and interpret complex datasets has become crucial for businesses aiming to thrive in dynamic markets [1, 2].

Management analytics has emerged as a pivotal approach in controlling data for strategic decision-making

across various sectors. It integrates techniques from operations research, statistics, and machine learning to analyze business processes, thereby enhancing operational efficiency and strategic outcomes. This field specifically targets managerial applications of data, aiming to optimize the use of resources, improve service delivery, and boost performance across all levels of an organization [3, 4, 5].

The scope of management analytics is broad, encompassing a range of applications from supply chain operations to customer relationship management and human resources. It involves the systematic use of data to drive decisions in a way that adds value to businesses. By applying analytics, organizations can achieve more precise fore-



casting, improved risk management, and better resource allocation, leading to increased operational effectiveness and competitive advantages in the marketplace [6, 7].

In practice, management analytics is integrated deeply into various business functions. It aids in identifying patterns and insights within large volumes of data, helping managers to make informed decisions. For instance, in supply chain management, analytics can optimize inventory levels and enhance the efficiency of logistics operations.

Similarly, in marketing, it can analyze consumer behavior patterns to tailor products and services to meet the demands of the market more effectively [8, 9, 10].

The advancement of technology has significantly expanded the capabilities of management analytics. Modern tools and platforms powered by artificial intelligence and machine learning algorithms enable the handling of big data sets, providing insights that were previously unattainable. These technologies facilitate real-time data processing and visualization, allowing managers to react promptly to emerging trends and operational challenges [11, 12].

Management analytics significantly contributes to organizational decision-making by integrating extensive data analysis to enhance operational and strategic outcomes. This field employs advanced statistical and computational methodologies to extract actionable insights from large datasets, enabling businesses to optimize processes, reduce costs, and improve overall efficiency. In various sectors, from healthcare to retail, management analytics facilitates better resource management, predictive maintenance, customer relationship management, and more, driving innovation and competitive advantage. The realtime data processing capabilities of management analytics also support dynamic decision-making, helping organizations to respond more swiftly and effectively to changing market conditions. Thus, management analytics emerges as a crucial tool for modern businesses, providing a foundation for data-driven strategies that foster growth and sustainability [13, 14, 15].

The structure of the paper is as follows. Section 2 illustrates the evolution of management analytic. Section 3 interprets its methodologies. Section 4 explores its applications. Section 5 identifies prevalent challenges and future trajectory. Section 6 concludes the paper.

## EVOLUTION OF MANAGEMENT ANALYTICS

The concept of management analytics has roots in traditional business intelligence and statistical analysis, evolving over the decades through advancements in computational technologies and analytics software. This evolution has been marked by a shift from simple descriptive analytics to complex models that predict future trends and behavior, thereby enabling proactive management strategies [16, 17].

Management analytics initially grew out of the broader field of business intelligence, rooted in statistical analysis and data management. Historically, it focused primarily on descriptive analytics, which involved reporting previous data to inform management when making decisions. This phase was characterized by the use of basic statistical tools and manual data collection methods, aimed at simplifying vast amounts of business data into understandable reports [18, 19].

As computing technology has been advancing in the late 20<sup>th</sup> century, management analytics began to incorporate more sophisticated software tools, leading to the development of decision support systems [DSS]. These systems used historical data to provide in-sights and support more complex decision-making processes. The availability of more robust computational resources allowed for the processing of larger datasets and the use of more complex mathematical models [20].

The introduction of predictive analytics marked a significant evolution in management analytics. By leveraging statistical models and forecasting techniques, businesses could not only interpret historical data but also predict future trends. This capability transformed management practices by enabling proactive rather than reactive decision-making, using methods such as regression analysis, timeseries forecasting, and later machine learning techniques [21].

The big data revolution in the early 21<sup>st</sup> century further propelled the evolution of management analytics. The integration of big data technologies with management analytics tools allowed for the handling of unstructured and semi-structured data, enhancing the analytical capabilities of organizations. Machine learning algorithms became increasingly important, providing new ways to analyze data and automate complex decision-making processes [22].

Today, management analytics is heavily influenced by advancements in artificial intelligence [AI] and deep learning. These technologies allow for even more sophisticated analysis, such as sentiment analysis, image recognition, and natural language processing, which can be used to glean insights from data that was previously inaccessible for analysis. AI-driven analytics supports real-time decision-making and offers predictive insights with a high degree of accuracy [23].

The field of management analytics is poised for further growth with the integration of IoT [Internet of Things] and more advanced AI capabilities. These developments promise to deliver more comprehensive, automated, and nuanced analytics solutions. However, challenges such as data privacy, ethical concerns related to AI, and the need for significant computational resources remain. The future of management analytics will depend on how effectively these challenges are addressed and how seamlessly new technologies can be integrated into existing analytical frameworks [24].



## METHODOLOGICAL ADVANCES IN MANAGEMENT ANALYTICS

Recent methodological advances in management analytics involve sophisticated algorithms and machine learning techniques that offer deeper insights into data than ever before. Techniques such as data envelopment analysis, machine learning models, and network analytics have revolutionized how businesses approach problems in areas such as logistics, human resources, and customer relationship management

### Statistical Analysis and Optimization

Initially, management analytics relied heavily on statistical methods and linear programming to optimize operations and predict outcomes. These methods provided a foundation for decision-making by identifying trends and optimizing resource allocation [25].

### Advent of Machine Learning and Artificial Intelligence

The introduction of machine learning and artificial intelligence marked a pivotal shift in management analytics. These technologies allowed for the automation of data analysis processes and enabled more accurate predictions by learning from data without explicit programming [26].

### Big Data Analytics

As organizations began to handle vast amounts of data, big data analytics emerged as a critical methodological advance. Tools and frameworks like Hadoop and Spark facilitated the processing of large datasets, allowing for more granular insights into business operations [27].

### Predictive Analytics and Its Impact

Predictive analytics has transformed management analytics by allowing businesses to anticipate future trends and behaviors. Techniques such as regression analysis, time series analysis, and machine learning models have been crucial in forecasting customer behavior, sales trends, and supply chain needs [28, 29].

### Real-Time Analytics

The ability to analyze data in real-time has greatly enhanced management analytics' responsiveness. Technologies that support streaming data have enabled businesses to make informed decisions swiftly, adapting to changes as they occur [30].

## Cloud Computing and Analytics

Cloud computing has democratized access to powerful analytics tools, providing scalability and flexibility. This advancement has allowed even small enterprises to leverage sophisticated analytics without the need for significant hardware investments. The current generation of computers and hi-tech sector require nanotechnologies to create smarter and more compact electronic devices. With a cloud architecture, fewer computers, hardware, and IT services are required, but demand is focused on the efficiency and smaller size of data-centers equipment [45].

### Integration of IoT with Management Analytics

The Internet of Things [IoT] has provided a new dimension to management analytics by enabling the collection and analysis of data from connected devices. This integration has been particularly transformative in industries like manufacturing and logistics. The Internet of Things has the potential to provide a vast amount of real-time data, which can be used in management analytics to enhance the efficiency of smart devices with nanotechnologies. For instance, nanosensors that can operate in harsh environments. In the future, integrating IoT with nanotechnology could lead to the creation of innovative smart devices. This integration has the potential to revolutionize various sectors, such as healthcare, manufacturing, energy, and agriculture. IoT in nanoscale manufacturing and energy harvesting has also shown promising results, but there are still challenges that need to be addressed.

### Advanced Visualization Tools

Visualization tools have evolved to offer more interactive and intuitive ways to understand complex data sets. Tools like Tableau and Power BI help translate analytical results into actionable insights through dynamic dashboards and reports [31, 32].

These methodological advancements have collectively enhanced the strategic capabilities of management analytics, enabling more precise and forward-looking insights that drive better business decisions. Each phase of evolution has built upon the previous, paving the way for a future where analytics is deeply embedded in management practices. Decision-making in risk management is usually based on high-quality analysis of big data is of much importance for the insurance industry. The innovative fintech developments such as of Peak3 could become the drivers of profound changes on an established market. Peak3 supports life, health, and P&C insurance, and has been adopted by leading insurers and digital platforms. With the new funding, Peak3 will accelerate its capabilities



ties in data processing and artificial intelligence. Recent achievements include the launch of a multi-country insurance core system and issuing over a billion policies globally, marking significant progress in its mission to modernize the insurance industry.<sup>1</sup>

### Applications in Different Sectors

The application of management analytics spans numerous sectors including finance, healthcare, retail, and manufacturing. Each sector benefits uniquely; for instance, healthcare institutions implement analytics to improve patient outcomes and optimize treatment paths, while retail businesses use analytics to understand consumer behavior and enhance personalization. Management analytics has revolutionized various industries by providing data-driven insights that enhance efficiency, profitability, and strategic planning. Its applications are diverse, spanning sectors from healthcare and finance to retail and manufacturing. In risk management AI and Big Data can help banks in detecting and preventing fraud, money laundering, cyberattacks, and other risks by analyzing large volumes of data and identifying patterns, anomalies, and such behaviors. Cyber-security is an application of AI that is specifically designed to protect computer networks, programs, and data from attacks, illegal access, amendments, or destruction [21].

### Healthcare

In healthcare, management analytics is used to improve patient outcomes through predictive models that assess risk factors and predict patient trajectories. It helps in resource allocation, staff scheduling, and personalized patient care plans, thereby increasing operational efficiency and patient satisfaction [33]. All this will lead to an improvement in the quality of life for the population through the introduction of new technologies for monitoring and diagnosing health, the organization of an efficient health system, and the reduction of budget expenditures through better analysis and monitoring of health data [46]. To a greater extent, improving the quality of life can also be associated with the widespread use of nanotechnology in medicine for the creation of various nanoparticles with unique properties, such as high mechanical strength, resistance to chemical influences, and surface activity, thanks to the peculiarities of their structure. These properties make it possible to create new materials and devices based on them, which can successfully treat the most complex

diseases. At the stage of development and evaluation, the use of management analytics tools will significantly reduce the time required for risk assessment and patient satisfaction analysis.

### Finance

The financial sector leverages management analytics for risk assessment, fraud detection, and customer segmentation. By analyzing transaction patterns and customer behavior, banks can offer tailored services, enhance security measures, and optimize their financial products.

Predictive analytics, social banking, behavioral finance and open banking are some of the creative and new services that financial institutions offer, made possible by big data and artificial intelligence tools. For example, artificial intelligence helps banks identify data on customer preferences and promptly offer solutions on demand [23]. In the financial sector, digital technologies and analytics are transforming the very business model of service provision. Ecosystem-oriented platform services are being formed, including all segments of the financial market [banking, insurance, investment segment, pension segment] radically changing the interaction between the financial service provider and the client. The services themselves are becoming more complicated, and the risks of fraud are increasing. It is in managing such a risk and reducing it that the role of management analytics is seen in the near future.

### Retail

In retail, management analytics optimizes inventory management, enhances customer relationship management, and predicts consumer buying behaviors. Retailers use these insights to tailor marketing strategies, optimize supply chains, and improve customer experiences [34, 35].

### Manufacturing

Manufacturing industries employ management analytics to streamline production processes, reduce downtime, and enhance quality control. Predictive maintenance models predict equipment failures before they occur, significantly reducing unplanned downtime and maintenance costs [36]. The most promising use of management analytics in the production sector can be demonstrated by the example of the development of new materials using nanotechnology. But new materials based on nanotechnology carry not only advantages, but also risks. At present, it is difficult to unambiguously characterize various nanoparticles from the point of view of their potential danger to human health. Often contradictory data from a few studies do not allow to make an informed decision without using management analytics methods.

<sup>1</sup> <https://fintech.global/2024/09/11/singapore-based-peak3-secured-the-largest-asian-insurtech-deal-as-funding-rounds-halved-in-h1/>



## Supply Chain and Logistics

Management analytics transforms supply chain operations by optimizing routes, reducing transportation costs, and improving delivery times. It enables companies to respond dynamically to supply chain disruptions and manage inventory more efficiently [37, 38].

## Education

In the education sector, management analytics helps institutions in student retention strategies, curriculum development, and resource allocation. By analyzing student data, educational institutions can identify at-risk students, tailor educational offerings, and improve educational outcomes.

## Energy

Energy companies use management analytics to optimize power generation and distribution. Predictive models help in forecasting demand, managing load, and integrating renewable energy sources, thus ensuring efficient energy management and reducing operational costs. The efficiency of global energy companies in their business lines [upstream, downstream, midstream] can be supported by artificial intelligence and big data by reducing information asymmetry and transaction costs. For example, artificial intelligence is becoming a tool that helps service companies with the processing necessary information in the shortest possible time, reducing the number of errors and extra costs.

## Agriculture

In agriculture, management analytics aids in crop yield prediction, soil health monitoring, and resource optimization. Data-driven insights help farmers make informed decisions about planting, harvesting, and resource allocation, leading to increased productivity and sustainability. On the basis of management analytics a large number of nanomaterials with specified properties have been created to avoid friction and wear of parts, which extends the service life of tractors and other agricultural machinery. Currently, the work is underway to develop sorbents based on nanotechnology for the prevention of toxicosis of various natures, reducing man-made pressure on the human and animal body [47].

## Telecommunications

Telecom companies apply management analytics to enhance network performance, predict system failures, and improve customer service. By analyzing call data records, companies can improve network coverage,

reduce churn rates, and enhance customer satisfaction [39, 40].

## Real Estate

The real estate sector uses management analytics for market analysis, property valuation, and investment risk assessment. Real-time data analysis helps in predicting market trends, optimizing pricing strategies, and identifying profitable investment opportunities [41].

## Tourism and Hospitality

In tourism and hospitality, management analytics is crucial for optimizing booking systems, personalizing customer experiences, and managing facilities. Predictive analytics help in forecasting demand, which assists in revenue management and staffing.

## Sports

Sports organizations use management analytics for player performance analysis, injury prediction, and fan engagement strategies. By analyzing game data, teams can enhance player performance, reduce injury risks, and improve game strategies. "Nano-high-tech" solutions today are available not only to sports professionals. Big data technologies and generative AI allow us to go further. Nanorobots can interfere with natural biochemical processes to achieve higher athletic performance – it's still a concept, but experiments with nanocapsules capable of releasing active substances in the right place at the right time are already underway. Another wide field for the use of nanotechnology and artificial intelligence is sports pharmacology. Scientists are experimenting with nanocapsules [molecules in the structure of which active substances are enclosed] capable of releasing their contents in the right place at the right time. For example, oxygen released during peak loads or drugs that are not considered doping and that "improve" biochemical processes in the body can be used as an active substance.

## Government and Public Sector

In the public sector, management analytics is used for urban planning, public safety, social insurance, and resource allocation. Data-driven insights help in traffic management, crime prediction, and efficient public resource management. Management analytics makes it possible to use advances in nanotechnology that help decrease the harmful impact of various pollutants on the environment: for example, the collection and processing of big data for this science provides new opportunities for recycling solid municipal waste in large urban ag-



glomerations, water purification, determination of toxic elements, etc.

Across all these sectors, management analytics plays a pivotal role in transforming data into actionable insights that lead to improved decision-making and enhanced operational efficiencies. As data continues to grow in volume and complexity, the role of management analytics in driving industry innovations and improvements is only set to increase.

## CHALLENGES AND FUTURE DIRECTIONS

Management analytics, despite its robust growth and widespread adoption across various industries, faces significant challenges. These challenges stem primarily from the rapid evolution of data technologies, the increasing complexity of data, and the heightened expectations for data-driven decision-making in real-time environments.

### Data Quality and Integration

A primary challenge in management analytics is the quality and integration of data. Organizations often struggle with disparate data sources that are siloed and inconsistent. The difficulty in integrating these data sources can lead to incomplete analytics and potentially misleading outcomes that could affect strategic decisions [42].

### Privacy and Security Concerns

As data privacy laws become more stringent globally, organizations must navigate the complexities of data compliance while striving to leverage data for analytics. Ensuring privacy and securing data against breaches while maintaining the utility of analytics systems is a significant challenge that requires ongoing attention and innovation [43].

### Skill Gap and Talent Acquisition

The skill gap in data science and analytical expertise is another critical challenge. The demand for professionals who can interpret complex data and derive insights exceeds the supply. This gap can hinder the implementation of effective management analytics, as organizations struggle to recruit and retain qualified personnel. As new technology-related occupations emerge, there is a growing demand for more skilled personnel. The key in-demand areas are data scientists, business analysts,

data engineers. To meet these growing needs, upskilling is paramount.

## Future Directions: AI and Automation

Looking ahead, the integration of artificial intelligence [AI] and automation in management analytics is seen as a promising direction. AI can address many of the current challenges by enhancing data processing capabilities, generating more accurate predictions, and providing deeper insights into complex datasets [44].

## Ethical Implications and Governance

As AI becomes more integrated into management analytics, ethical implications and governance will come to the forefront. Organizations will need to establish clear policies and frameworks to govern the ethical use of AI and analytics, ensuring that decisions derived from such systems are transparent, fair, and accountable. Artificial intelligence should not deprive humans of their role in the intellectual sphere. On the contrary, we have opportunities to reconsider the established ideas about human knowledge and learning. This will become the basis for uniting the efforts of society, which can lead to the creation of a future digital environment focused on people and accessible to everyone.

## CONCLUSION

The documents reviewed underscore the multifaceted role of management analytics in enhancing organizational performance across various sectors, showcasing its profound impact on operational efficiency, strategic decision-making, and competitive advantage. Through the evolution of analytics methodologies from basic statistical approaches to advanced machine learning and AI integration, management analytics has not only adapted to the complexities of modern data but also driven significant business transformations. However, challenges such as data privacy, the analytical skills gap, and the need for continuous technological advancements persist, demanding robust solutions. As management analytics continues to evolve, it will be pivotal for organizations to address these challenges and leverage the latest innovations to stay competitive in a data-driven world. This dynamic interplay of innovation and adaptation highlights the ongoing significance of management analytics in shaping the future of business practices globally.



## REFERENCES

1. Sigov, A., Ratkin, L., Ivanov, L.A. et al. Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond. Inf Syst Front (2022). <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w>
2. Lu Y, Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA, Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. Journal of Industrial Information Integration. 2023 Aug 23;100511. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511>
3. Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA. Quantum information technology. Journal of Industrial Information Integration. 2022 Jul 1;28:100365. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100365>
4. Li X, Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA, Li L. Artificial intelligence applications in finance: a survey. Journal of Management Analytics. 2023 Oct 2;10(4):676–92. <https://doi.org/10.1080/23270012.2023.2244503>
5. Pisarenko Zh.V., Kuznetsova N.P., Mitin S.G. Financial Convergence and Financial Conglomerates in the Global Economy. Saint Petersburg; 2011.
6. Ivanov L.A., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Borisova O.N. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part I. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(1): 18–26. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-18-26>
7. Ivanov LA., Razumeev K.E., Bokova E.S., Muminova S.R. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part V. Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 6, pp. 719–729. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-6-719-729>
8. Ivanov LA., Prokopiev P.S. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part IV. Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 4, pp. 447–457. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-447-457>
9. Ivanov L.A., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Muminova S.R. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part I. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(1): 23–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-13-1-23-31>
10. Ivanov LA., Prokopiev P.S. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part III. Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no.3, pp. 292–303. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-3-292-303>
11. Ivanov L.A., Xu L.D., Muminova S.R., Feoktistova V.M., Romanova E.V. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(2): 105–112. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-105-112>
12. Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Nguyen C.T., Muminova S.R. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part IV. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(4): 242–251. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-242-251>
13. Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Wang Q., Prokopiev P.S. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(2): 79–89. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-79-89>
14. Ivanov L.A., Demenev A.V., Muminova S.R. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 2, pp. 175–185. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-2-175-185>



15. Ivanov L.A., Xu L.D., Razumeev K.E., Feoktistova V.M., Prokopiev P.S. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part V. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(5): 311–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-311-318>
16. Ivanov L.A., Borisova O.N., Muminova S.R. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part I. Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 1, pp. 91–101. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-1-91-101>
17. Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Muminova S.R., Miloradova N.G. Inventions in the area of nanotechnologies and nanomaterials. Part I. Nanotechnologies in Construction. 2023; 15(1): 37–47. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-37-47>. – EDN: PPOMEI.
18. Ivanov L.A., Xu L.D., Muminova S.R., Ishkov A.D., Demenev A.V. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part III. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(6): 466–474. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-466-474>. – EDN: QGCTUF.
19. Razmanova S.V., Machula I.A., Pisarenko Zh.V. Modeling of forecast prices for liquefied natural gas for China. Gas industry. 2015; 8 (726):19-24.
20. Nazarov V.G., Ivanov L.A., Dedov A.V., Bokova E.S., Statnik E.S. Gradient non-woven fabrics with a modified surface nanolayer for water filtration in construction industry. Nanotechnologies in construction. 2023; 15(2): 117–123. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-117-123>. – EDN: ASVYVS.
21. Titov V.O., Dostov V.L., Pisarenko Zh.V., Lvova N.A., Krivoruchko S.V., Shust P.M., Vashchuk A.E. The Role of Modern Financial Technologies in Overcoming Barriers to Access to Retail Financial Services. Economics and Entrepreneurship. 2024; (170): 483–489.
22. J.F. Fan, A. Sigov, L. Ratkin, L.A. Ivanov, S.W. Chen, C.M. Zhang. Acquisition and cognition information of human body swing. Journal of Industrial Information Integration. 2022; 30:100391. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100391>
23. Pisarenko Zh.V. Features of Bank Insurance in Russia: Protection of the Interests of Consumers of Complex Financial Services. Actual problems of economics and law. 2013; 2: 140–146.
24. Davenport, Thomas H. Competing on analytics. Harvard business review. 2006; (84:1): 98.
25. Hsieh P.H. Exploratory analysis of grocery product networks. Journal of Management Analytics. 2022; (9:2): 169–184.
26. Arishi C., Krishnan K. A multi-agent deep reinforcement learning approach for solving the multi-depot vehicle routing problem. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 493–515.
27. Dehkhodaei A., Amiri B., Farsijani H., Raad A. Barriers to big data analytics (BDA) implementation in manufacturing supply chains. Journal of Management Analytics. 2023; (10:1): 191–222.
28. Karabağ O., Fadiloğlu M.M. Augmented Winter's method for forecasting under asynchronous seasonalities. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 19–35.
29. Das S., Mishra S., Senapati M. Improving time series forecasting using elephant herd optimization with feature selection methods. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 113–133.
30. Fainshmidt, Stav, Witt M.A., Aguilera R.V., Verbeke A. The contributions of qualitative comparative analysis (QCA) to international business research. Journal of International Business Studies. 2020; (51): 455–466.



31. Liu X., Liu F., Li Y., Shen H., Lim E.T.K., Tan C.W. Image Analytics: A consolidation of visual feature extraction methods. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 569–597.
32. Gao W., Jiang N., Gu F. Understanding the role of streamers in livestreaming commerce: a vocal–visual perspective. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:2): 247–269.
33. Liu Y., Fuller B., Hester K., Chen H.. Authentic leadership and employees' job performance: mediation effect of positive employee health. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:3): 566–582.
34. Malleeswaran B., Uthayakumar R. A single-manufacturer multiretailer sustainable reworking model for green and environmental sensitive demand under discrete ordering cost reduction. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:1): 109–128.
35. Bhavani G.D., Mahapatra G.S., Kumar A. An integrated fuzzy production inventory model for manufacturer–retailer coordination under simple carbon tax system. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:1): 38–88.
36. Maiti A.K. Cloudy fuzzy inventory model under imperfect production process with demand dependent production rate. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 741–763.
37. Samanta B., Giri B.C., Chaudhuri K. A supply chain model with two competitive buyers under a hybrid greening cost and revenue-sharing contract. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:2): 270–307.
38. Latpate R., Bhosale M., Kurade S. Cold supply chain inventory models for agricultural products with multi-stage stochastic deterioration rates. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:3): 516–549.
39. Chen H., Li L., Chen Y. Sustainable growth research – A study on the telecom operators in China. *Journal of Management Analytics*. 2022; (9:1): 17–31.
40. Bansal G., Anand A., Aggrawal D. Modeling multigenerational diffusion for competitive brands: an analysis for telecommunication industries. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 715–740.
41. Shi H., Ma Z., Chong D., He W. The impact of Facebook on real estate sales. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:1): 101–112.
42. Zhang S., Yan Y., Wang P., Xu Z., Yan X. Sustainable maintainability management practices for offshore assets: A data-driven decision strategy. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 237: 117730.
43. Wang M., Feng X. Price squeeze under fairness: the road to supply chain coordination with a powerful retailer. *Journal of Management Analytics*. 2022; (9:4): 448–479.
44. Isupova O., Kuzin D., Mihaylova L. Learning methods for dynamic topic modeling in automated behavior analysis. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2017; (29:9): 3980–3993.
45. Paul P.K., Jayati Lahiri Dey Nanotechnology Vis-à-Vis Computing: With special references to cloud computing, big data management – A techno managerial knowledge study. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8245151>
46. Samsonova M.V. Nanomedicine: current approach to diagnosis and treatment of diseases and safety issues. *Jour. Pulmonology*. 2008; 6–12. <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/viewFile/1842/1341>
47. Tarasova E. Yu., Korosteleva V. P., Ponomarev V. Y. Application of nanotechnologies in agriculture. 2012; 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nanotehnologiy-v-selskom-hozyaystve> (Accessed: 11.09.2024).



#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yang Lu – PhD**, Professor of Management Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing, China, zii-yuu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8400-3983>

**Zhanna V. Pisarenko** – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Faculty of Economics, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Lei Yang** – PhD, student at Shenyang University of Technology, her research interest is block-chain-based supply chain finance, Shenyang, China, yanglei@smail.sut.edu.cn

**Leonid A. Ivanov** – Cand. Sci. (Eng.), Vice President of the Russian Academy of Engineering, Member of the International Journalist Federation; Moscow, Russia, L.a.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

**Chengang Ye** – Professor, he is currently the Director of the Institute of Modern Accounting and Auditing at the University of International Business and Economics, the Director of the Daxin Audit Research Center, the Director of the Business Ethics and Corporate Social Responsibility Research Center, the Director of the Venture Capital Management Research Center, Beijing, China, yechengang@126.com

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors contributed equally to this article.

#### The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 16.08.2024; approved after reviewing 20.09.2024; accepted for publication 27.09.2024.



## Совершенствование процесса принятия решений: роль управленческой аналитики в современной бизнес-практике

Ян Лу<sup>1\*</sup>, Жанна Викторовна Писаренко<sup>2</sup>, Лэй Ян<sup>3</sup>, Леонид Алексеевич Иванов<sup>4</sup>, Чэнган Йе<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Пекинский университет технологий и бизнеса, Пекин, Китай

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Шэньянский технологический университет, Шэньян, Китай

<sup>4</sup> Российская инженерная академия, Москва, Россия

<sup>5</sup> Университет международного бизнеса и экономики, Пекин, Китай

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: ziiyuu@gmail.com

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Управленческая аналитика — это развивающаяся область науки, которая получила широкое распространение как в академических кругах, так и в бизнесе благодаря своему значительному влиянию на процессы принятия решений в современных условиях. Внедрение в рамках управленческой аналитики в процесс принятия решений передовых информационных технологий и искусственного интеллекта способствует генерации инновационных решений и подходов. **Эволюция управленческой аналитики.** Данная дисциплина объединяет в процессе принятия решений разные методы, в том числе статистический анализ, прогнозное моделирование и визуализацию данных в целях оптимизации бизнес-стратегий компаний, повышения операционной эффективности и финансовых показателей. По мере развития и внедрения управленческих практик они привносят новые аспекты и возможности для сбора и анализа данных, открывая уникальные возможности для развития сложных отраслей, требующих анализа больших данных, например, нанотехнологий. **Методологические достижения в области управленческой аналитики.** В данном исследовании рассмотрены трансформационные эффекты управленческой аналитики для различных производственных секторов, иллюстрирующих эволюцию и интерпретирующих аналитические методологии с особым акцентом на нанотехнологии. **Применение в различных секторах.** Использование методов управленческой аналитики значительно улучшает процесс принятия решений на практике благодаря использованию сложных алгоритмов анализа данных, интерпретируя стратегическую информацию таким образом, чтобы способствовать повышению эффективности и конкурентоспособности компании. В то же время использование методов управленческой аналитики в области нанотехнологий поднимает вопросы, касающиеся этических последствий и регуляторных соображений. **Проблемные вопросы и направления будущих исследований.** В современных условиях остаются нерешенными и вызывают определенные сложности интеграция методов аналитики менеджмента в сложившиеся бизнес-процессы, обеспечение безопасности данных, нехватка квалифицированных кадров. **Заключение.** Данная обзорная статья формирует общее представление о потенциале развития управленческой аналитики и ее важности в современном менеджменте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** управленческая аналитика, принятие решений, аналитика данных, наука об управлении.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лу Я., Писаренко Ж.В., Ян Л., Иванов Л.А., Йе Ч. Совершенствование процесса принятия решений: роль управленческой аналитики в современной бизнес-практике // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 431–440. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-431-440>. – EDN: MDCKFD.

### ВВЕДЕНИЕ

Управленческая аналитика представляет собой всесторонний подход к пониманию и использо-

ванию данных в управленческом контексте. Такой подход позволяет компаниям и организациям максимально использовать свои внутренние информационные возможности для принятия стратегических



решений и достижения конкурентных преимуществ на рынке. В эпоху, отмеченную цифровой трансформацией и появлением колоссальных объемов данных, способность анализировать и интерпретировать сложные наборы данных стала критически важной для любого бизнеса, стремящегося к процветанию на динамично развивающихся рынках [1, 2].

Управленческая аналитика в настоящее время становится одним из ключевых подходов для работы с аналитическими данными для принятия стратегических решений в различных секторах экономики. При использовании такого дохода интегрируются различные методы исследования в статистике и машинного обучения для анализа бизнес-процессов, тем самым может повышаться операционная эффективность и стратегические результаты предприятия. Эта новая область специально нацелена на формирование процесса внедрения методов принятия решений на основе больших данных, направленных на оптимизацию использования ресурсов, улучшение предоставления услуг и повышение производительности на всех уровнях организации [3, 4, 5].

Область применения управленческой аналитики широка и охватывает целый ряд приложений: от операций в цепочке поставок до управления взаимоотношениями с клиентами и управления персоналом. Она включает в себя систематическое использование данных для принятия решений таким образом, чтобы повысить ценность бизнеса. Применяя методы управленческой аналитики, организации могут добиться более точного прогнозирования, улучшения системы управления рисками и лучшего распределения ресурсов, что приведет в конечном итоге к повышению операционной эффективности и конкурентным преимуществам на рынке [6, 7].

На практике управленческая аналитика должна быть глубоко интегрирована в различные бизнес-функции всех подразделений компании. Это способствует выявлению закономерностей и получению аналитических сведений в больших объемах данных, помогая при этом менеджерам принимать обоснованные решения. Например, в управлении цепочками поставок управленческая аналитика может оптимизировать уровни запасов и повысить эффективность логистических операций.

Аналогичным образом в маркетинге могут быть проанализированы модели поведения потребителей, чтобы адаптировать продукты и услуги для более эффективного удовлетворения потребностей рынка [8, 9, 10].

Развитие технологий значительно расширило возможности управленческой аналитики. Современные инструменты и платформы, основанные на алгоритмах искусственного интеллекта и машинного обучения, позволяют работать с большими наборами

данных, собирая и предоставляя информацию в объемах, которые ранее было невозможно представить. Эти технологии облегчают обработку и визуализацию данных в режиме реального времени, позволяя менеджерам оперативно реагировать на возникающие тенденции и текущие операционные задачи [11, 12].

Управленческая аналитика вносит значительный вклад в принятие организационных решений за счет интеграции обширного анализа данных для улучшения операционных и стратегических результатов. В этой области используются передовые статистические и вычислительные методологии для извлечения полезной информации из больших наборов данных, что позволяет предприятиям оптимизировать процессы, снижать издержки и повышать общую эффективность. В различных секторах, от здравоохранения до розничной торговли, управленческая аналитика способствует более эффективному управлению имеющимися ресурсами, профилактическому обслуживанию, управлению взаимоотношениями с клиентами и т. д., стимулируя внедрение инноваций и получение конкурентных преимуществ. Возможности обработки данных в режиме реального времени в управленческой аналитике также поддерживают динамичное принятие решений, помогая организациям быстрее и эффективнее реагировать на изменяющиеся рыночные условия. Таким образом, управленческая аналитика становится важнейшим инструментом для современного бизнеса, обеспечивая основу для формирования стратегий, основанных на данных, способствующих росту и устойчивому развитию [13, 14, 15].

Структура статьи следующая. Раздел 2 иллюстрирует эволюцию развития управленческой аналитики. В разделе 3 представлена методология исследования. В разделе 4 рассматривается практическое приложение управленческой аналитики. В разделе 5 определены имеющиеся препятствия и будущие траектории развития. В разделе 6 представлены основные выводы исследования.

## ЭВОЛЮЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ АНАЛИТИКИ

Концепция управленческой аналитики уходит корнями в традиционную бизнес-аналитику и статистический анализ, развиваясь на протяжении десятилетий благодаря достижениям в области вычислительных технологий и аналитического программного обеспечения. Данная эволюция представляла собой переход от простой описательной аналитики к сложным моделям, которые предсказывают будущие тенденции и поведение бизнес-агентов, тем самым обеспечивая проактивные стратегии управления [16, 17].



Управленческая аналитика изначально выросла из более широкой области бизнес-аналитики, уходящей корнями в статистический анализ и управление данными. Исторически сложилось так, что бизнес-аналитика была сосредоточена в основном на описательной аналитике, которая включала в себя анализ отчетности предыдущих периодов для информирования руководства при принятии решений. Этот этап характеризовался использованием базовых статистических инструментов и ручных методов сбора данных, направленных на упрощение огромных объемов бизнес-данных в понятные отчеты [18, 19]. По мере развития вычислительных технологий в конце XX-го века в управленческой аналитике стали использоваться все более сложные программные инструменты, что привело к развитию систем поддержки принятия решений (Decision Support Systems – DSS). В таких системах поддержки принятия решений использовались исторические данные для получения аналитической информации и поддержки более сложных процессов принятия решений. Наличие в распоряжении управленцев более надежных вычислительных ресурсов позволило обрабатывать большие наборы данных и использовать более сложные математические модели [20].

Внедрение предиктивной аналитики (или предсказательной аналитики) ознаменовало собой значительную эволюцию в управленческой аналитике. Используя статистические модели и методы прогнозирования, комплекс методов анализа данных и способов их интерпретации, компании могли не только интерпретировать исторические данные, но и прогнозировать будущие тенденции. Новые возможности позволили начать трансформирование методов управления, обеспечив упреждающее, а не реактивное принятие решений с использованием таких методов, как регрессионный анализ, прогнозирование временных рядов и более поздние методы машинного обучения [21].

Революция в области повсеместного использования больших данных в начале XXI века еще более ускорила развитие управленческой аналитики. Интеграция технологий больших данных с инструментами управленческой аналитики позволила обрабатывать неструктурированные и полуструктурированные данные, расширив аналитические возможности менеджмента организаций. Алгоритмы машинного обучения стали приобретать все большее значение, предоставляя новые способы анализа данных и автоматизации сложных процессов принятия решений [22].

Сегодня на управленческую аналитику большое влияние оказывают современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) и глубинного обучения. Эти технологии позволяют проводить еще

более сложный анализ, такой как анализ тональности, распознавание изображений и обработка естественного языка, которые теперь стало возможным использовать для извлечения информации из данных, которые ранее были недоступны для анализа. Аналитика на основе искусственного интеллекта поддерживает принятие решений в режиме реального времени и предлагает прогнозную аналитику с высокой степенью точности [23].

Область управленческой аналитики готова к дальнейшему росту и развитию с интеграцией Интернета вещей IoT (Internet of Things) и более продвинутыми возможностями искусственного интеллекта. Эти разработки обещают уже в ближайшем будущем предоставить более комплексные, автоматизированные и тонкие аналитические инструменты для принятия решений. Тем не менее, такие проблемы, как конфиденциальность данных, этические проблемы, связанные с искусственным интеллектом, и потребность в значительных вычислительных ресурсах остаются актуальными. Будущее управленческой аналитики будет зависеть от того, насколько эффективно будут решаться эти проблемы и насколько органично новые технологии могут быть интегрированы в существующие аналитические структуры [24].

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ АНАЛИТИКИ

Современные методологические достижения в области управленческой аналитики включают в себя сложные алгоритмы и методы машинного обучения, которые обеспечивают более глубокое понимание данных, чем когда-либо прежде. Такие методы, как анализ среды функционирования, модели машинного обучения и сетевая аналитика произвели революцию в подходе компаний к поиску решений в таких областях, как логистика, управление персоналом и взаимоотношениями с клиентами.

### Статистический анализ и оптимизация

Первоначально управленческая аналитика в значительной степени опиралась на статистические методы и линейное программирование для оптимизации операций и прогнозирования результатов. Эти методы обеспечивали основу для принятия решений путем общих тенденций и оптимизации распределения ресурсов [25].

### Появление машинного обучения и искусственного интеллекта

Внедрение машинного обучения и искусственного интеллекта ознаменовало собой кардинальный



сдвиг в управленческой аналитике. Эти технологии позволили организациям автоматизировать процессы анализа данных и формулировать более точные прогнозы за счет обучения на основе данных без явного программирования [26].

### **Аналитика больших данных**

Когда организации начали обрабатывать огромные объемы данных, аналитика больших данных стала критически важным методологическим достижением для дальнейшего развития. Развитие таких инструментов и платформ, как Hadoop и Spark, упростили обработку больших наборов данных, что позволило получить более детальное представление о бизнес-операциях [27].

### **Предиктивная аналитика и ее влияние**

Предиктивная аналитика трансформировала управленческую аналитику, позволив специалистам-практикам анализировать и предвидеть будущие тенденции и поведение партнеров и потребителей. Такие методы, как регрессионный анализ, анализ временных рядов и модели машинного обучения имеют решающее значение для прогнозирования поведения клиентов, тенденций продаж и потребностей цепочки поставок [28, 29].

### **Аналитика в режиме реального времени**

Возможность анализировать данные в режиме реального времени значительно повысила скорость реагирования при использовании методов управленческой аналитики. Технологии, поддерживающие потоковую передачу данных, позволили компаниям быстро принимать обоснованные решения, адаптируясь к изменениям по мере их возникновения [30].

### **Облачные вычисления и аналитика**

Облачные вычисления упростили и расширили доступ к мощным аналитическим инструментам, обеспечив масштабируемость и гибкость. Это достижение позволило даже малым предприятиям использовать сложную аналитику без необходимости значительных инвестиций в необходимое оборудование. Нынешнее поколение компьютеров и сектор высоких технологий требуют нанотехнологий для создания более умных и компактных электронных устройств. При облачной архитектуре требуется меньше компьютеров, оборудования и ИТ-услуг, но спрос сосредоточен на эффективности и меньшем размере оборудования центров обработки данных [45].

### **Интеграция IoT с аналитикой управления**

Интернет вещей (IoT) открыл новое измерение и новые возможности в управленческой аналитике, позволив собирать и анализировать данные с подключенных устройств. Произошедшая интеграция с IoT стала особенно трансформационной в таких отраслях, как производство и логистика. Интернет вещей обладает потенциалом для предоставления огромного объема данных в режиме реального времени, которые могут быть использованы в управленческой аналитике для повышения эффективности интеллектуальных устройств с нанотехнологиями. Например, наносенсоры, которые могут работать в суровых условиях. В будущем интеграция IoT с нанотехнологиями может привести к созданию инновационных умных устройств. Эта интеграция может революционизировать различные секторы, такие как здравоохранение, производство, энергетика и сельское хозяйство. Интернет вещей в наноразмерном производстве и сборе энергии также показал многообещающие результаты, но все еще существуют проблемы, которые необходимо решить.

### **Расширенные инструменты визуализации**

Совершенствование инструментов визуализации позволяет сегодня предложить более интерактивные и интуитивно понятные способы понимания для персонала компании сложных наборов данных. Такие инструменты, как Tableau и Power BI помогают преобразовывать аналитические результаты в полезную информацию с помощью динамических панелей мониторинга и отчетов [31, 32].

Имеющиеся методологические достижения инструментов визуализации в совокупности расширили стратегические возможности управленческой аналитики, позволив получать более точные прогнозы и перспективные идеи, которые способствуют принятию лучших бизнес-решений. Каждый этап эволюции основывался на предыдущих, прокладывая путь к будущему, в котором аналитика глубоко укоренилась в практике управления. Принятие решений в риск-менеджменте обычно основывается на качественном анализе больших данных, что имеет большое значение для страховой отрасли. Инновационные Финтех-разработки, такие как Peak3, могут стать драйверами глубоких изменений на устоявшемся рынке. Инновационная разработка Peak3 поддерживает такие виды страхования, как страхование жизни, страхование здоровья и страхование имущества, что позволяет интегрировать их ведущими страховщиками и цифровыми платформами. Peak3 имеет большой потенциал для расширения возможностей использования в финансовых услугах обра-



ботки данных и искусственного интеллекта. Среди недавних достижений — запуск глобальной системно значимой страховой облачной платформенной системы, позволяющей организовать взаимодействие страховщиков по всему миру с клиентами на основе ИИ. С помощью платформы уже продано более одного миллиарда полисов по всему миру, что свидетельствует о значительном прогрессе в выполнении миссии по модернизации страховой отрасли<sup>1</sup>.

### Применение в различных отраслях

Применение управленческой аналитики охватывает множество секторов, включая финансы, здравоохранение, розничную торговлю и производство. Каждый сектор получает уникальные преимущества. Например, медицинские учреждения внедряют аналитические инструменты для оптимизации протоколов лечения и, как следствие, улучшения результатов лечения пациентов, в то время как розничные предприятия используют аналитику для понимания поведения потребителей и улучшения персонализации продаж. Управленческая аналитика произвела революцию в различных отраслях, предоставляя аналитическую информацию, основанную на данных, которая повышает эффективность, прибыльность и стратегическое планирование. Приложения методов управленческой аналитики весьма разнообразны, они охватывают секторы от здравоохранения до розничной торговли, от производства до финансов. Например, Искусственный интеллект и большие данные могут помочь банкам в выявлении и предотвращении мошенничества, отмывания денег, кибератак и других рисков, анализируя большие объемы данных и выявляя закономерности, аномалии и подобное поведение. Кибербезопасность — это применение искусственного интеллекта, специально разработанного для защиты компьютерных сетей, программ и данных от атак, незаконного доступа, изменений или уничтожения [21].

### Здравоохранение

В здравоохранении управленческая аналитика используется для улучшения результатов лечения пациентов с помощью прогностических моделей, которые оценивают факторы риска и прогнозируют траектории развития заболеваний у пациентов. Методы управленческой аналитики помогают в распределении ресурсов, составлении графиков работы персонала и индивидуальных планах ухода за пациентами, тем

самым повышая эффективность работы и удовлетворенность пациентов [33]. Все это приведет к повышению качества жизни населения посредством внедрения новых технологий мониторинга и диагностики здоровья в медицинском страховании, организации эффективной системы здравоохранения, снижению бюджетных расходов с помощью более качественного анализа и мониторинга данных о здоровье [46]. В большей степени значение аналитики в медицине важно для повышения качества жизни при профилактике и лечении заболеваний в связи с широким применением нанотехнологий в медицине при создании различных наночастиц, обладающих уникальными свойствами, такими как высокая механическая прочность, устойчивость к химическим воздействиям, поверхностная активность, обусловленными особенностями их структуры, позволяющими создавать на их основе новые материалы и устройства. Именно методы управленческой аналитики позволяют ускорить период от разработки до применения инновационных материалов и устройств в широкой практике здравоохранения. Это позволит успешно лечить самые сложные заболевания. Дополнительно на этапе разработки и оценки применение инструментов аналитики менеджмента позволит существенно уменьшить время на оценку рисков и анализ удовлетворенности пациентов.

### Финансовый сектор

В финансовом секторе управленческая аналитика используется для оценки рисков, выявления мошенничества и сегментации клиентов. Анализируя шаблоны транзакций и поведение клиентов, финансовые институты могут предлагать индивидуальные услуги, усиливать меры безопасности и оптимизировать свои финансовые продукты.

Предиктивная аналитика, социальный банкинг, поведенческие финансы и открытый банкинг — вот некоторые из креативных и новых услуг, которые предлагают финансовые учреждения. Такие финансовые продукты появились именно благодаря инструментам больших данных и искусственного интеллекта. Например, искусственный интеллект помогает банкам идентифицировать данные о предпочтениях клиентов и оперативно предлагать решения по запросу [23]. В финансовом секторе цифровые технологии и аналитика трансформируют саму бизнес-модель предоставления услуг. Формируются экосистемно-ориентированные платформенные сервисы, охватывающие все сегменты финансового рынка (банковский, страховой, инвестиционный сегмент, пенсионный сегмент), кардинально меняющие взаимодействие между поставщиком финансовых услуг и клиентом. Сами услуги усложняются,

<sup>1</sup> <https://fintech.global/2024/09/11/singapore-based-peak3-secured-the-largest-asian-insurtech-deal-as-funding-rounds-halved-in-h1/>



а риски мошенничества возрастают. Именно в управлении таким риском и его снижении видится роль управленческой аналитики в ближайшем будущем.

### Розничный сегмент

В розничном сегменте торговли методы управленческой аналитики применимы для оптимизации управления запасами, улучшения управления взаимоотношений с клиентами и прогнозирования покупательского поведения разных групп потребителей. Розничные продавцы используют эту информацию для адаптации маркетинговых стратегий, оптимизации цепочек поставок и улучшения качества обслуживания клиентов [34, 35].

### Производство

В обрабатывающей промышленности использование методов управленческой аналитики обусловлено необходимостью оптимизации производственных процессов, сокращения простоев и улучшения контроля самого производственного процесса и качества производимой продукции. Модели предиктивного обслуживания прогнозируют отказы оборудования до того, как они произойдут, что значительно сокращает незапланированные простои и затраты на техническое обслуживание [36]. Наиболее перспективное применение управленческой аналитики в производственном секторе можно продемонстрировать на примере разработки новых материалов с использованием нанотехнологий. При этом важно понимать, что новые материалы на основе нанотехнологий несут в себе не только преимущества, но и риски. В настоящее время сложно однозначно охарактеризовать различные наночастицы с точки зрения их потенциальной опасности для здоровья человека. Часто противоречивые данные нескольких исследований не позволяют принять взвешенное решение без использования методов управленческой аналитики.

### Цепочки поставок и логистика

Управленческая аналитика трансформирует операции сети вспомогательных служб за счет оптимизации маршрутов, снижения транспортных расходов и сокращения времени доставки. Это позволяет компаниям динамично реагировать на сбои в цепочке поставок и более эффективно управлять запасами [37, 38].

### Образование

В секторе образования управленческая аналитика помогает учебным заведениям в разработке и со-

вершенствовании стратегий удержания студентов, разработке учебных программ и оптимальном распределении имеющихся ресурсов. Анализируя данные об учащих, учебные заведения могут выявлять учащихся из группы риска, адаптировать образовательные программы под текущие нужды государства и общества и улучшать образовательные результаты.

### Энергетический сегмент

Энергетические компании используют управленческую аналитику для оптимизации производства и распределения электроэнергии. Предиктивные модели помогают прогнозировать спрос, управлять нагрузкой на сети в пиковые часы и интегрировать возобновляемые источники энергии с традиционными, тем самым обеспечивая эффективное управление и снижая эксплуатационные расходы. Глобальные энергетические компании в своих основных бизнес-направлениях (upstream, downstream, midstream) могут быть поддержаны искусственным интеллектом и большими данными за счет снижения информационной асимметрии и транзакционных издержек. Например, искусственный интеллект становится инструментом, который помогает сервисным компаниям с обработкой необходимой информации в кратчайшие сроки, снижая количество ошибок и лишних затрат.

### Сельское хозяйство

В сельском хозяйстве управленческая аналитика помогает прогнозировать урожайность, контролировать состояние почвы и оптимизировать ресурсы. Аналитика, основанная на данных, помогает фермерам принимать обоснованные решения о посадке, сборе урожая и распределении ресурсов, что приводит к повышению производительности и устойчивости. На основании методов управленческой аналитики и анализа данных разрабатываются специальные инновационные наноматериалы с заданными свойствами для ведения сельскохозяйственных работ в сложных погодных условиях, когда важно избежать трения и износа деталей, что продлевает срок службы тракторов и другой сельскохозяйственной техники и снижает издержки производителя. Кроме того, в животноводстве на основе анализа больших данных ведутся разработки специализированных сорбентов на основе нанотехнологий для профилактики токсикозов различной природы, снижения техногенной нагрузки на организм человека и животных [47].

### Телекоммуникации

Телекоммуникационные компании применяют управленческую аналитику для повышения произво-



длительности сетей, прогнозирования сбоев в работе систем и улучшения обслуживания клиентов. Анализируя записи данных о произведенных звонках, компании могут улучшить покрытие сети, снизить отток клиентов и повысить их удовлетворенность [39, 40].

### Недвижимость

В секторе недвижимости управленческая аналитика используется для анализа рынка, оценки недвижимости и оценки инвестиционных рисков. Анализ данных в режиме реального времени помогает прогнозировать рыночные тенденции, оптимизировать стратегии ценообразования и выявлять выгодные инвестиционные возможности [41].

### Туризм и гостеприимство

В сфере туризма и гостеприимства управленческая аналитика имеет решающее значение для оптимизации систем бронирования, персонализации клиентского опыта и управления объектами. Предиктивная аналитика помогает в прогнозировании спроса, что влияет на повышение рентабельности бизнеса, а также в подборе персонала.

### Спортивная индустрия

Спортивные организации используют управленческую аналитику для анализа эффективности и подготовленности спортсменов прогнозирования травм и стратегий взаимодействия с болельщиками. Анализируя данные матчей, игр и состязаний, менеджмент команды может повысить производительность игроков, снизить риски травм и улучшить игровые стратегии. Технологии больших данных и генеративный искусственный интеллект позволяют сегодня идти дальше и использовать методы управленческой аналитики для «более тонкой настройки» спортсменов. «Нановысокотехнологичные» решения сегодня доступны не только профессионалам в области спорта. Нанороботы могут вмешиваться в естественные биохимические процессы для достижения более высоких спортивных результатов — это все еще концепция, но эксперименты с нанокапсулами, способными высвобождать активные вещества в нужном месте в нужное время, уже ведутся. Еще одним широким полем применения нанотехнологий и искусственного интеллекта является спортивная фармакология. Ученые экспериментируют с нанокапсулами (молекулами, в структуру которых заключены активные вещества), способными высвобождать свое содержимое в нужном месте в нужное время. Например, в качестве активного вещества может быть

использован кислород, выделяющийся при пиковых нагрузках, или препараты, которые не считаются допингом и которые «улучшают» биохимические процессы в организме.

### Государственное управление

В государственном секторе управленческая аналитика используется для городского планирования, улучшения общественной безопасности, социального страхования и распределения ресурсов. Аналитика на основе данных помогает в управлении дорожным движением, прогнозировании преступности и эффективном управлении общественными ресурсами. Для улучшения экологической обстановки в городах управленческая аналитика позволяет использовать достижения нанотехнологий, которые помогают снизить вредное воздействие различных загрязнителей на окружающую среду: например, сбор и обработка больших данных дает новые возможности для переработки твердых коммунальных отходов в крупных городских агломерациях, очистки воды, определения токсичных элементов и т.д.

Во всех этих секторах управленческая аналитика играет ключевую роль в преобразовании данных в практическую информацию, которая приводит к улучшению процесса принятия решений и повышению операционной эффективности. По мере того как объем и сложность данных продолжают расти, роль управленческой аналитики в продвижении инноваций и улучшений в отрасли будет только возрастать.

### ВЫЗОВЫ И НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Управленческая аналитика, несмотря на ее уверенный рост и широкое распространение в различных отраслях, сталкивается со значительными препятствиями. Прежде всего, это связано, в первую очередь, с быстрым развитием технологий обработки данных, растущей сложностью данных и повышенными ожиданиями в отношении принятия решений на основе данных в режиме реального времени.

### Качество и интеграция данных

Основной проблемой в управленческой аналитике является качество и интеграция данных. Организации часто сталкиваются с проблемой разрозненных и несогласованных источников данных, которым сложно доверять. Сложность интеграции этих источников данных может привести к неполной аналитике и потенциально вводящим в заблуждение результатам, которые могут повлиять на стратегические решения [42].



### Вопросы конфиденциальности и безопасности

По мере того как развивается законодательство о конфиденциальности данных, появляются все более строгие нормы по всему миру, организациям приходится ориентироваться в сложностях соблюдения требований к данным, стремясь использовать данные для аналитики. Обеспечение конфиденциальности и защита данных от утечек при сохранении полезности аналитических систем является серьезной задачей, требующей постоянного внимания и инноваций [43].

### Разрыв в навыках и привлечение талантов

Недостаток навыков персонала в области науки о данных и аналитической экспертизы является еще одной важной проблемой. Спрос на специалистов, которые могут интерпретировать сложные данные и получать аналитические выводы, пока превышает предложение. Этот пробел может препятствовать внедрению эффективной управленческой аналитики, поскольку организации испытывают трудности с наймом и удержанием квалифицированного персонала. По мере появления новых профессий, связанных с технологиями, растет спрос на более квалифицированные кадры. Ключевые востребованные направления — дата-сайентисты, бизнес-аналитики, дата-инженеры. Чтобы удовлетворить эти растущие потребности, первостепенное значение имеет повышение квалификации персонала.

### Будущие направления: искусственный интеллект и автоматизация

В перспективе наиболее востребованным направлением видится еще большая интеграция генеративного искусственного интеллекта (ИИ) и автоматизации в управленческую аналитику. Генеративный ИИ может помочь в поиске решений многих текущих проблем за счет расширения возможностей обработки данных, создания более точных прогнозов и обеспечения более глубокого понимания сложных наборов данных [44].

### Этические последствия и управление

По мере того как ИИ становится все более интегрированным в управленческую аналитику, эти-

ческие последствия при принятии решений будут выходить на первый план. Организациям необходимо будет разработать четкую политику и рамки для регулирования этичного использования ИИ и аналитики, гарантируя, что решения, принимаемые на основе таких систем, являются прозрачными, справедливыми и подотчетными. Искусственный интеллект не должен лишать человека его роли в интеллектуальной сфере. Напротив, у нас есть возможности пересмотреть устоявшиеся представления о человеческом знании и обучении. Это станет основой для объединения усилий общества, что может привести к созданию будущей цифровой среды, ориентированной на людей и доступной для всех.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье подчеркивается многогранная роль управленческой аналитики в повышении эффективности организаций различных секторов экономики и государственного управления, продемонстрировано влияние методов управленческой аналитики на операционную эффективность, принятие стратегических решений и повышение конкурентных преимуществ. Благодаря эволюции методологии аналитики от базовых статистических подходов до передового машинного обучения и интеграции генеративного искусственного интеллекта, управленческая аналитика не только успешно адаптируется к сложным современным данным, но и приводит к значительной трансформации в бизнесе.

Тем не менее, такие проблемы, как конфиденциальность данных, недостаток квалифицированного персонала, потребность в постоянном изменении и совершенствовании сохраняются, требуя надежных и современных решений. По мере того как управленческая аналитика продолжает развиваться, организациям будет крайне важно интегрировать инновационные методы и использовать новейшие достижения информационных технологий, чтобы оставаться конкурентоспособными в мире, управляемом данными. Такое динамичное взаимодействие инноваций и адаптации бизнес-процессов подчеркивает непреходящее значение управленческой аналитики в формировании будущего деловой практики во всем мире.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sigov, A., Ratkin, L., Ivanov, L.A. et al. Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond. Inf Syst Front (2022). <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w>
2. Lu Y, Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA, Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. Journal of Industrial Information Integration. 2023 Aug 23;100511. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511>
3. Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA. Quantum information technology. Journal of Industrial Information Integration. 2022 Jul 1;28:100365. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100365>
4. Li X, Sigov A, Ratkin L, Ivanov LA, Li L. Artificial intelligence applications in finance: a survey. Journal of Management Analytics. 2023 Oct 2;10(4):676–92. <https://doi.org/10.1080/23270012.2023.2244503>
5. Писаренко Ж.В., Кузнецова Н.П., Митин С.Г. Финансовая конвергенция и финансовые конгломераты в мировой экономике. Санкт-Петербург. 2011.
6. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Бокова Е.С., Ишков А.Д., Борисова О.Н. Изобретения в области наноматериалов и нанотехнологий. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 1. С. 18–26. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-18-26>
7. Иванов Л.А., Разумеев К.Э., Бокова Е.С., Муминова С.Р. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть V // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 6. С. 719–729. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-6-719-729>
8. Иванов Л.А., Прокопьев П.С. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть IV // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 4. С. 447–457. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-447-457>
9. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Бокова Е.С., Ишков А.Д., Муминова С.Р. Изобретения ученых, инженеров и специалистов из разных стран в области нанотехнологий. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Том 13, № 1. С. 23–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-1-23-31>
10. Иванов Л.А., Прокопьев П.С. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 3. С. 292–303. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-3-292-303>
11. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Муминова С.Р., Феоктистова В.М., Романова Е.В. Изобретения в области наноматериалов и нанотехнологий. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 2. С. 105–112. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-105-112>
12. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Писаренко Ж.В., Нгуен К.Т., Муминова С.Р. Изобретения ученых, инженеров и специалистов из разных стран в области нанотехнологий. Часть IV // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Том 13, № 4. С. 242–251. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-242-251>
13. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Писаренко Ж.В., Ванг Ц., Прокопьев П.С. Изобретения ученых, инженеров и специалистов из разных стран в области нанотехнологий. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Том 13, № 2. С. 79–89. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-79-89>
14. Иванов Л.А., Деменев А.В., Муминова С.Р. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 2. С. 175–185. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-2-175-185>
15. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Разумеев К.Э., Феоктистова В.М., Прокопьев П.С. Изобретения ученых, инженеров и специалистов из разных стран в области нанотехнологий. Часть V // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 5. С. 311–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-311-318>
16. Иванов Л.А., Борисова О.Н., Муминова С.Р. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 1. С. 91–101. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-1-91-101>
17. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Писаренко Ж.В., Муминова С.Р., Милорадова Н.Г. Изобретения в области нанотехнологий и наноматериалов. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 1. С. 37–47. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-37-47>. – EDN: PPOMEI.
18. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Муминова С.Р., Ишков А.Д., Деменев А.В. Изобретения в области наноматериалов и нанотехнологий. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 6. С. 466–474. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-466-474>. – EDN: QGCTUF.
19. Разманова С.В., Мачула И.А., Писаренко Ж.В. Моделирование прогнозных цен на сжиженный природный газ для КНР. Газовая промышленность. 2015. № 8 (726). С. 19–24.
20. Назаров В.Г., Иванов Л.А., Дедов А.В., Бокова Е.С., Статник Е.С. Градиентные нетканые материалы с модифицированным поверхностным нанослоем для фильтрационной подготовки воды в строительстве // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 2. С. 117–123. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-117-123>. – EDN: ASVYVS.
21. Титов В.О., Достов В.Л., Писаренко Ж.В., Львова Н.А., Криворучко С.В., Шуст П.М., Ващук А.Э. Роль современных финансовых технологий в преодолении барьеров для доступа к розничным финансовым услугам. Экономика и предпринимательство. 2024. № 9 (170). С. 483–489.
22. J.F. Fan, A. Sigov, L. Ratkin, L.A. Ivanov, S.W. Chen, C.M. Zhang. Acquisition and cognition information of human body swing. Journal of Industrial Information Integration. 2022; 30:100391. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100391>
23. Писаренко Ж.В. Особенности банкострахования в России: защита интересов потребителей сложных финансовых услуг. Актуальные проблемы экономики и права. 2013. № 2. С. 140–146.
24. Davenport, Thomas H. Competing on analytics. Harvard business review. 2006; (84:1): 98.
25. Hsieh P.H. Exploratory analysis of grocery product networks. Journal of Management Analytics. 2022; (9:2): 169–184.
26. Arishi C., Krishnan K. A multi-agent deep reinforcement learning approach for solving the multi-depot vehicle routing problem. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 493–515.



27. Dehkhodaei A., Amiri B., Farsijani H., Raad A. Barriers to big data analytics (BDA) implementation in manufacturing supply chains. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:1): 191–222.
28. Karabağ O., Fadiloğlu M.M. Augmented Winter's method for forecasting under asynchronous seasonalities. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:1): 19–35.
29. Das S., Mishra S., Senapati M. Improving time series forecasting using elephant herd optimization with feature selection methods. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:1): 113–133.
30. Fainshmidt, Stav, Witt M.A., Aguilera R.V., Verbeke A. The contributions of qualitative comparative analysis (QCA) to international business research. *Journal of International Business Studies*. 2020; (51): 455–466.
31. Liu X., Liu F., Li Y., Shen H., Lim E.T.K., Tan C.W. Image Analytics: A consolidation of visual feature extraction methods. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 569–597.
32. Gao W., Jiang N., Gu F. Understanding the role of streamers in livestreaming commerce: a vocal–visual perspective. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:2): 247–269.
33. Liu Y., Fuller B., Hester K., Chen H.. Authentic leadership and employees' job performance: mediation effect of positive employee health. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:3): 566–582.
34. Malleeswaran B., Uthayakumar R. A single-manufacturer multiretailer sustainable re-working model for green and environmental sensitive demand under discrete ordering cost reduction. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:1): 109–128.
35. Bhavani G.D., Mahapatra G.S., Kumar A. An integrated fuzzy production inventory model for manufacturer–retailer coordination under simple carbon tax system. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:1): 38–88.
36. Maiti A.K. Cloudy fuzzy inventory model under imperfect production process with demand dependent production rate. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 741–763.
37. Samanta B., Giri B.C., Chaudhuri K. A supply chain model with two competitive buyers under a hybrid greening cost and revenue-sharing contract. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:2): 270–307.
38. Latpate R., Bhosale M., Kurade S. Cold supply chain inventory models for agricultural products with multi-stage stochastic deterioration rates. *Journal of Management Analytics*. 2023; (10:3): 516–549.
39. Chen H., Li L., Chen Y. Sustainable growth research – A study on the telecom operators in China. *Journal of Management Analytics*. 2022; (9:1): 17–31.
40. Bansal G., Anand A., Aggrawal D. Modeling multigenerational diffusion for competitive brands: an analysis for telecommunication industries. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:4): 715–740.
41. Shi H., Ma Z., Chong D., He W. The impact of Facebook on real estate sales. *Journal of Management Analytics*. 2021; (8:1): 101–112.
42. Zhang S., Yan Y., Wang P., Xu Z., Yan X. Sustainable maintainability management practices for offshore assets: A data-driven decision strategy. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 237: 117730.
43. Wang M., Feng X. Price squeeze under fairness: the road to supply chain coordination with a powerful retailer. *Journal of Management Analytics*. 2022; (9:4): 448–479.
44. Isupova O., Kuzin D., Mihaylova L. Learning methods for dynamic topic modeling in automated behavior analysis. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2017; (29:9): 3980–3993.
45. Paul P.K., Jayati Lahiri Dey Nanotechnology Vis-à-Vis Computing: With special references to cloud computing, big data management – A techno managerial knowledge study. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2017. DOI: 10.1109/IPACT.2017.8245151
46. Samsonova M.V. Nanomedicine: current approach to diagnosis and treatment of diseases and safety issues. *Jour. Pulmonology*. 2008; 6–12. <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/viewFile/1842/1341>
47. Тарасова Е. Ю., Коростелева В. П., Пономарев В. Я. Применение нанотехнологий в сельском хозяйстве // Вестник Казанского технологического университета. 2012. 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nanotekhnologiy-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 11.09.2024).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лу Ян** – доктор философии, профессор в области менеджмента и инженерных наук, Пекинский университет технологий и бизнеса, Пекин, Китай, [ziiyuu@gmail.com](mailto:ziiyuu@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8400-3983>

**Писаренко Жанна Викторовна** – доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, экономический факультет, кафедра управления рисками и страхования, Санкт-Петербург, Россия, [z.pisarenko@spbu.ru](mailto:z.pisarenko@spbu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Ян Лэй** – аспирант, Шэньянский технологический университет, Шэньян, Китай, [yanglei@smail.sut.edu.cn](mailto:yanglei@smail.sut.edu.cn)

**Иванов Леонид Алексеевич** – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов, Москва, Россия, [L.a.ivanov@mail.ru](mailto:L.a.ivanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

**Чэнган Йе** – профессор, директор Института современного учета и аудита Университета международного бизнеса и экономики, директор Даксинского исследовательского центра аудита, директор Исследовательского центра деловой этики и корпоративной социальной ответственности, директор Исследовательского центра управления венчурным капиталом, Пекин, Китай, [yechengang@126.com](mailto:yechengang@126.com)

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в эту статью.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.08.2024; одобрена после рецензирования 20.09.2024; принята к публикации 27.09.2024.





## WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Wuhan University of Technology (WUT), is a state key university directly affiliated to the Ministry of Education of the People's Republic of China. WUT is among the first batch of universities which have entered the national "211 Project" and China's "Double-First Class" Initiative. WUT is jointly developed by the Ministry of Education and the Ministry of Transport. As the university directly affiliated to the Ministry of Education which cultivates the largest number of talents in three major industrial sectors, namely, building and construction materials, transportation, and automobile industries, WUT becomes an important base for the cultivation of high-level scientific talents and technological innovation for the three industrial sectors.

WUT has three campuses, including Mafangshan campus, Yujiatou campus and the South Lake campus,

with a total land area of 2.67 million square meters and a total gross floor area of 1.95 million square meters. Currently, WUT has over 50,000 faculty and students, 24 academic schools, 4 National Technology Innovation Bases and 4 modern libraries with a collection of 3.61 million books. Since 2000, WUT has been awarded over 20 national science and technology prizes, ranking in the forefront of all Chinese colleges and universities. In 2019, WUT was listed in Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

Since the founding of New China, WUT has cultivated more than 600,000 senior professionals. In the past decade, the first-time employment rate of graduates has



remained above 95%, and about 55% of total employment join world's top 500 enterprises and fields of strategic emerging industries.

Over the years, WUT has formed educational ideology system with distinctive characteristics, with the lofty ideal of “Building an excellent university to win worldwide recognition and admiration”, the spirit of “Sound in morality, broad in learning and pursuing excellence”, the principle of “Taking students’ cultivation as our essence, and taking academic development as our priority”, and the educational concept of “Implementing excellent education, nurturing excellent talents and creating an excellent life”. Guided by the WUT Charter approved by the Ministry of Education, WUT is committed to the modernization of the governance system and capability, aiming to rank among the world-class universities with distinctive features.

### MSE Discipline of Wuhan University of Technology

Founded in 1958, the Materials Science & Engineering (MSE) discipline of Wuhan University of Technology (WUT) was supported in priority through the “State 211 Project for Higher Education Universities” from 1995 to 2015, and has been supported via the “World-Class University & World-Class Discipline” development plan of China since 2016. WUT’s MSE ranks A+ among 172 leading universities in China (No.1 alongside MSEs of Tsinghua University and Beihang University) in the 4<sup>th</sup> round national discipline evaluation organized by the Ministry of Education in 2017, and is world top 1% in Clarivate Analytics’ Essential Science Indicators.

WUT’s MSE owns 1 member of Chinese Academy of Sciences, 3 members of Chinese Academy of Engineering, 3 members of Academia Europaea, 1 member of the Royal Academy of Belgium, 1 member of the World Academy of Ceramics, 1 fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering, 10 fellows of the Royal Society of Chemistry, American Physics Society and American Ceramic Society. It also owns 23 national high-level talents including recipients of the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (equal of NSF Career Awards), and 22 national high-level young talents.

WUT’s MSE has established 2 state key laboratories, the State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing and the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures. The State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing was evaluated “Excellence” among 21 state key laboratories in MSE in 2018. It also has built 2 state international joint-research laboratories, and 4 bases of foreign outstanding expertise-introduction for discipline innovation (also known as “111 Project”).

### International School of Materials Science and Engineering

The International School of Materials Science and Engineering (ISMSE) was selected into the list of “Network of International Centers for Education” supported by the State Administration of Foreign Experts







Affairs and Ministry of Education of P. R. C. in June 2015 as one of the 16 international schools all over the country.

Driven by the “National innovation driven development strategy” and the great demand for national higher education reformation, ISMSE is devoted to building a world-leading MSE discipline through optimizing a high-level research and teaching team, constructing an innovative training pilot zone and establishing an innovative talents training system. Guided by the idea of “enterprise cooperation, international cooperation and research cooperation”, ISMSE organized 21 mentor teams lead by academicians or distinguished professors and 4 interdisciplinary innovation and entrepreneurship training teams.

Aiming at leading the world’s building materials and new materials in the 21st century, ISMSE values the innovative ability as one of the core capabilities and reform the innovative talent training system of the bachelor program, master and PhD program and international program. ISMSE provides students with a comprehensive curriculum, which covers materials science, life science, energy science, environmental science, information science and advanced manufacturing science. To expose all students to international experiences, joint training programs were created in cooperation with world-leading universities. Furthermore, ISMSE built a variety of platforms for students’ all-round development, such as Distinguished Scholars Forum, International Vision Forum, Quality Education Seminar and Material Advantage WUT Chapter. The Material Advantage WUT Chapter was awarded Chapter of Excellence Award in the past 5 years from 2018 to 2022.

#### **State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing (Wuhan University of Technology)**

The State Key Laboratory of Advanced Technology for Material Synthesis and Processing was approved by the State Development Planning Commission in 1987. After state inspection, it was opened for the public in March 1990. The laboratory is under the direct administration of the Ministry of Science and Technology. Currently, Professor Gu Binglin, an academican of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory’s academic committee, and Professor Fu ZhengYi, an academican of the Chinese Academy of Engineering, is the Director of the laboratory. The laboratory is located in the Wuhan University of Technology, and it is a state key laboratory that specializes in the field of new materials. The Department of Materials Science and Engineering at the Wuhan University of Technology has been classified as a first-class State Key Discipline, included in the national “985” project of “Build a world-class discipline program,” and is ranked as A+ in the fourth round of national discipline evaluation. Aiming at the global frontier research of materials science and addressing the primary national needs, this laboratory provides a world-class platform for materials compounding and preparation technology, for developing advanced composite materials for national major projects and pillar industries, and for providing support at the national strategic level. Original and systematic research results, with international impact in transformative technologies, frontier new materials, and interdisciplinary fields, have been reported in this



laboratory, and therefore, it leads the international development in several strategic frontier new materials. The laboratory fosters the development of global first-class research talent through advanced scientific research in the field of materials science and technology. In addition, the laboratory has created a culture of international collaborative innovation and has carried out “Win-Win” international cooperative research, thereby enhancing the international influence, attractiveness, and cohesion of the laboratory. The laboratory has achieved a historic breakthrough in the evaluation of the State Key laboratories in the field of materials science.

Centering on the overall vision and objectives, the laboratory focuses on the establishment and development of multi-component, multi-scale, and multi-level composite principles and material design theories that are built on core research platforms comprising material gradient composite technology, in-situ composite technology, nanocomposite technology, and their integrated innovations. Currently, research on five key materials, including advanced composite materials for national major projects and pillar industries, efficient energy conversion and storage materials for new energy technologies, nanocomposite biomaterials for life sciences, information functional materials for information technology, and frontier new materials for transformative technologies, is being carried out in this laboratory. Therefore, the laboratory has established the following five distinctive research directions: gradient composite technology and new materials, in-situ composite technology and new materials, nanocomposite technology and new materials, transformative technology and frontier

new materials, and material composite principles and material design.

The laboratory has an active and innovative research team that mainly comprise young and middle-aged researchers. There are hundred permanent staff members, including one academicien of the Chinese Academy of Sciences, two academicians of the Chinese Academy of Engineering, one academicien of the Royal Academies for Science and the Arts of Belgium, two academicians of the European Academy of Sciences and Arts, one academicien of the Australian Academy of Technology and Engineering, one academicien of the World Academy of Ceramics, twelve national level researchers, one chief scientist of the National “973” program, five recipients of the national “Outstanding Youth Science Fund,” and thirty recipients of the “national talent Support Plan”. etc. This laboratory has been actively supporting outstanding scholars to visit and conduct collaborative research worldwide in world-class universities and research institutions. In recent years, the laboratory has sent several outstanding young scholars to world-class international universities for more than one year to conduct visits and collaborative research.

The laboratory emphasizes global academic exchange and collaboration. In the last five years, we have hired twenty-five international scholars as honorary and visiting professors in the main research areas, with an aim to create cordial working conditions for world-renowned scientists to conduct collaborative research in the laboratory.

The laboratory has carried out substantial “Win-Win” collaborations with the University of Michigan; Japan







Aerospace Exploration Agency (JAXA); the Institute for Materials Research, Tohoku University (Japan); the Materials Research Center, University of Oxford (UK); Composites Research Center, the University of California (US); and the National Institute of Fuel Cells (Canada), among other internationally renowned research institutions. The Ministry of Science and Technology has established the “International Joint Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,” which is one of the first thirty-three international joint laboratories in China. Additionally, the State Administration of Foreign Experts Affairs and the Ministry of Education have jointly formed three discipline bases supported by the Program of Innovation and Talent Introduction, namely “New Material Composite Technology and Advanced Functional Materials,” “Advanced Preparation Technology and Application Engineering of New Functional Thin Film Materials,” and “Innovation and Talent Introduction Base of Life Composites.” Relying on these important international collaboration platforms, the laboratory has undertaken several state key projects with international collaborations and achieved fruitful results in international collaboration and exchanges.

Currently, the laboratory has a floor area of 25,350 square meters, with several advanced materials synthesis and processing instruments, as well as state-of-the-art instruments specializing in materials structure

analysis, characterization, and performance testing. The total estimated value of the instrumentation asset is approximately 430 million RMB.

### **Introduction to the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture**

The State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture was authorized by the Ministry of Science and Technology of China (MoST) in October 2011, and passed the expert acceptance of MoST in July 2013. The laboratory aims to solve the major fundamental theories and common key technology issues during the preparation and service process of silicate materials for architectures, develop low environmental load preparation methods and energy efficiency enhancement theories, research and develop high performance and multifunctional building materials to support major engineering construction and the development of green, energy-saving and intelligent building systems, and provide new theories, new methods and common key technologies for achieving long-term stability and recycling of building materials and structures.

The main research directions of the laboratory comprise the low environment load preparation, the functional design and regulation, the service behavior and life extension principles as well as the recycling design of silicate materials for architecture.





The Laboratory shares a construction area of 12 500 m<sup>2</sup> and lots of professional research equipment worth more than 100 million RMB, forming a research platform including eight professional secondary laboratories and one public experiment center. The research platform is able to support the research of the science and technology in the field of thermal equipment, cement and cementitious materials, concrete, glass, ceramics, film and coating, wall and road materials.

The Laboratory is open to both domestic and international applications, and values domestic and international academic exchanges and cooperation. Relying on the laboratory, the “International Science and Technology Cooperation Base for Environmental Friendly Building Materials” was established and was identified as a model of international science and technology cooperation base by MoST in 2013.

The innovation achievements of scientific research of the laboratory contribute a lot to the national economy and social development, including providing key technical support for the construction of national major infrastructures, boosting the structural transformation and technological upgrading of traditional building materials industry, and promoting the implementation of energy saving and emission reduction strategies.

### Introduction to Interdisciplinary Materials

The scientific journal *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) was launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021.

*Interdisciplinary Materials* is an open-access, peer-reviewed, and rapid-publication journal focusing on the interdisciplinary researches between materials science and other disciplines, such as physics, chemistry, mathematics, mechanics, biology, energy, environment, information, engineering, etc. The journal aims at reporting cutting-edge developments across science and technology around the world.

*Interdisciplinary Materials* is expected to take an interdisciplinary, frontier, and integrated approach to all areas of materials research while cultivating the exchange of ideas between scientists involved in the different disciplines. Readership includes physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

The first issue was published in Jan, 2022. It has been included in the Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex and Directory of Open Access Journals (DOAJ) databases.

### Contact information

Address: 122 Luoshi Road, Hongshan District, Wuhan, Hubei, P. R. China  
Postal Code: 430070  
Supporting Institution: Wuhan University of Technology  
Tel: 86-27-87884448; Fax: 86-27-87879466  
E-mail: sklwut@whut.edu.cn  
Contacts: Zhao Xiang, Zhou Lihua

R





## УХАНЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Уханьский технологический университет (УТУ) — национальный стратегический университет под прямым управлением Министерства образования. Является одним из первых университетов, вошедших в государственные программы «211 Project» и «Double-First Class» для содействия развитию университетов и научных направлений мирового уровня. УТУ был образован Министерством образования совместно с Министерством транспорта. Так как университет подчиняется напрямую Министерству образования, которое растит и развивает талантливые кадры в области строительства и строительных материалов, транспорта и автомобилестроения, УТУ стал важным центром по подготовке научных кадров и технологических инновационных разработок для этих трех крупнейших промышленных секторов.

Университет включает 3 кампуса: Мафангшан, Юдзитау и СауфЛейк, в общей сложности занимающих площадь 267 гектаров общей площадью зданий 1,95 млн м<sup>2</sup>. В настоящее время в УТУ работают более 50 тыс. человек персонала и студентов, 24 академические школы, 4 Национальных технологических инновационных центра и 4 современные библиотеки с фондом в 3,61 млн изданий. С 2000 года УТУ удостоился 20 государственных национальных научных и технических премий, занимая первые позиции в рейтинге всех китайских университетов и колледжей. В 2019 году УТУ был включен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.



С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 тыс. высокопрофессиональных специалистов. В течение последних десяти лет процент впервые трудоустроенных выпускников остается свыше 95% и составляет около 55% от всех трудоустроенных выпускников в международном рейтинге «Топ 500 компаний и новых отраслей».

На протяжении многих лет УТУ сформировал отличительную идеологию системы образования с высокими идеалами «Построения отличного университета для завоевания всемирного признания и восхищения», следуя девизу «Быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «Сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие — приоритетом». Университет воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию системы государственного регулирования с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

#### **Здание корпуса научного направления «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) Уханьского технологического университета**

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной про-

граммой «211 проектов для университетов» («State 211 Project for Higher Education Universities») в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты мирового уровня и научные направления мирового уровня» («World-Class University & World-Class Discipline»). Рейтинг этого направления составляет A+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№ 1 наравне с этим направлением в университетах Тцинхуа и Бейхан) в 4-ом раунде оценки, организованном Министерством образования в 2017 году, а также входит в топ 1% в международной системе Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

В развитие МИД вовлечены: 1 член Китайской академии наук, 3 члена Китайской инженерной академии, 3 члена Европейской академии, 1 член Бельгийской королевской академии, 1 член Международной академии керамики, 1 стипендиат Австралийской академии технологий и инженерии, 10 стипендиатов Королевского химического общества, Американского общества физики и Американского общества керамики. Также в МИД работают 23 китайских высокопрофессиональных сотрудника, некоторые из которых являются стипендиатами Национального фонда National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (аналогичен премии NSF Career Awards), и 22 китайских молодых специалиста.

Для содействия развитию научного направления МИД были основаны 2 государственных ключевых лаборатории: Государственная ключевая лаборатория передовых технологий синтеза и обработки







материалов и Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры. Первая лаборатория получила оценку «превосходно» среди 21 государственной ключевой лаборатории по МИД в 2018 году. Помимо этого, были построены 2 государственных международных лаборатории для совместных исследований и 4 базы внедрения зарубежных компетенций как инновационного составляющего научной области (известный как «111 Project»).

### Международная школа материаловедения и инженерии

Международная школа материаловедения и инженерного дела (МШМИД) была включена в список «Сети международных образовательных центров» при поддержке Государственной администрации КНР по делам иностранных экспертов и Министерства образования КНР в июне 2015 года как одна из 16 международных школ по всей стране.

Руководствуясь «Национальной стратегией развития, ориентированной на инновации» и большую потребность в реформировании национальной системы высшего образования, МШМИД стремится создать ведущее в мире направление МИД путем привлечения исследовательского и преподавательского состава высокого уровня, создания инновационной пилотной зоны обучения и формирования инновационной системы подготовки талантов. Руководствуясь идеями «сотрудничества предпри-

ятий, международной кооперации и сотрудничества в области исследований», МШМИД организовала 21 группу наставников под руководством ученых или видных профессоров, а также 4 междисциплинарные группы по обучению инновациям и предпринимательству.

Стремясь стать ведущим мировым разработчиком строительных материалов и новых материалов в 21 веке, МШМИД оценивает инновационные способности как одну из ключевых возможностей и проводит реформирование инновационной системы подготовки кадров в рамках программы бакалавриата, магистратуры и докторантуры, а также международной программы обучения. МШМИД предлагает студентам всеобъемлющую учебную программу, которая охватывает материаловедение, естественные науки, отраслевые энергетические науки, науки об окружающей среде, информатику и изучение передовых производственных технологий. Чтобы познакомить всех студентов с международным опытом, реализуются совместные программы обучения в сотрудничестве с ведущими мировыми университетами. Кроме того, при МШМИД создано несколько платформ для всестороннего развития студентов, таких как Форум выдающихся исследователей, Международный форум по видению будущего развития, Семинар оценки качества образования, Студенческое научное общество (СНО) материаловедения Уханьского технологического университета. СНО материаловедения пять лет подряд с 2018 по 2022 год удостоивается награды Chapter of Excellence Award.



**Государственная стратегическая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов (Уханьский технологический университет)**

Государственная ключевая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов была утверждена Государственной комиссией планирования развития в 1987 году. После государственной инспекции она была открыта для общественности в марте 1990 года. Лаборатория находится в непосредственном ведении Министерства науки и технологий. В настоящее время профессор Гу Бинлинь, академик Китайской академии наук, является председателем академического Комитета лаборатории, а профессор Фу Чжэн И, академик Китайской инженерной академии, является директором лаборатории. Лаборатория расположена в Уханьском технологическом университете и является ключевой государственной лабораторией, специализирующейся в области новых материалов. Факультет материаловедения и инженерного дела Уханьского технологического университета был классифицирован как первоклассное государственное ключевое научное направление, включенное в национальный проект «985», «Создание учебной программы мирового уровня» и получил оценку A+ в четвертом раунде национальной оценки научных направлений. Стремясь к глобальным передовым исследованиям в области материаловедения и удовлетворяя основные национальные потребности, эта лаборатория представляет собой платформу мирового класса для технологии компаундирования и подготовки материалов, для разработки передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и отраслей промышленности, а также для оказания поддержки на национальном стратегическом уровне. Лаборатория сообщила об оригинальных и систематических результатах исследований с международным участием в области трансформационных технологий, передовых новых материалов и междисциплинарных областей, и поэтому она возглавляет разработку нескольких стратегических передовых новых материалов на международном уровне. Лаборатория способствует развитию первоклассных исследовательских талантов во всем мире посредством передовых научных исследований в области материаловедения и технологий. Кроме того, лаборатория создала культуру международных совместных инноваций и провела международные совместные исследования по принципу «win-win», тем самым укрепив международное влияние, привлекательность и сплоченность лаборатории. Лаборатория добилась исторического прорыва по оценке ключевых государственных лабораторий в области материаловедения.



Сосредоточившись на общем видении и целях, лаборатория фокусируется на создании и разработке многокомпонентных, разномасштабных и многослойных композитных материалов и теории проектирования материалов, изучение которых строится на основных исследовательских платформах, включающих технологию градиентных композитных материалов, технологию изготовления композитных материалов «в момент образования», нанокompозитную технологию и интегрированные инновации. В настоящее время проводятся исследования пяти ключевых материалов, в том числе передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и опорных отраслей, материалов для эффективного преобразования и хранения энергии для новых энергетических технологий, нанокompозитных биоматериалов для естественных наук, информационных функциональных материалов для информационных технологий и передовых новых материалов для трансформационных технологий. Таким образом, лаборатория установила следующие пять отличительных направлений исследований: градиентная композитная технология и новые материалы, технология изготовления композитных материалов «в момент образования» и новые материалы, нанокompозитная технология и новые материалы, преобразующая технология и передовые новые материалы, а также принципы композитных материалов и дизайн материалов.

В лаборатории работает активная и инновационная исследовательская группа, состоящая в основном из молодых исследователей и исследователей среднего возраста. 100 постоянных сотрудников, в том числе 1 академик Китайской академии наук, 2 академика Китайской инженерной академии, 1 академик Королевской академии наук и искусств Бельгии, 2 академика Европейской академии наук и искусств, 1 академик Австралийской инженерно-технологической академии, 1 академик Всемирной академии керамики, 12 исследователей национального уровня, 1 главный научный сотрудник Национальной программы «973», 5 стипендиатов национального фонда





«Outstanding Youth Science Fund» и 30 стипендиатов «Национального плана поддержки талантов» и т.д. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых, которые приезжают и проводят совместные исследования по всему миру в университетах и исследовательских институтах мирового уровня. В последние годы лаборатория направила несколько выдающихся молодых ученых в международные университеты мирового уровня более чем на один год для проведения совместных исследований.

Лаборатория делает упор на глобальный академический обмен и сотрудничество. За последние пять лет мы приняли на работу 25 зарубежных ученых в качестве почетных и приглашенных профессоров в основных областях исследований с целью создания благоприятных условий работы для всемирно известных ученых и проведения совместных исследований в лаборатории. Лаборатория наладила взаимовыгодное сотрудничество с Мичиганским университетом; Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA); Институтом материаловедения Университета Тохоку (Япония); Центром исследования материалов Оксфордского университета (Великобритания); Центром исследования композитов Калифорнийского университета (США) и Национальным институтом топливных элементов (Канада), а также с другими всемирно известными научно-исследовательскими учреждениями. Министерство науки и технологий создало «Международную совместную лабораторию передовых технологий синтеза и обработки материалов», которая является одной из первых 33 международных совместных лабораторий в Китае. Кроме того, Государственная администрация КНР по делам иностранных экспертов и Министерство образования совместно сформировали три научные базы, поддерживаемые Программой инноваций и развития талантов, а именно «Новые композитные материалы и передовые функциональные материалы», «Передовые технологии подготовки и прикладного проек-

тирования новых функциональных тонкопленочных материалов» и «Инновации и таланты для увеличения срока службы композитов». Опираясь на эти важные платформы международного сотрудничества, лаборатория осуществила несколько ключевых государственных проектов с международным сотрудничеством и добилась плодотворных результатов.

В настоящее время площадь лаборатории составляет 25 тыс. 350 м<sup>2</sup>, с оснащением современным оборудованием для синтеза и обработки материалов, а также самыми современными приборами для анализа структуры материалов, характеристики и тестирования производительности. Общая оценочная стоимость оснащения лаборатории составляет приблизительно 430 млн юаней.

### **Знакомство с Государственной ключевой лабораторией силикатных материалов для архитектуры**

Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры получила одобрение для открытия Министерством науки и техники Китая (МНТК) в октябре 2011 года, а в июле 2013 года прошла экспертизу МНТК. Лаборатория развивает основные фундаментальные теории и общие ключевые технологические вопросы в процессе разработки и во время срока службы силикатных материалов для архитектуры, разрабатывает методы производства с низкой нагрузкой на окружающую среду и теории повышения энергоэффективности, исследует и разрабатывает высокоэффективные и многофункциональные строительные материалы для поддержки основных инженерных конструкций, разрабатывает экологически чистые, энергосберегающие и интеллектуальные строительные системы, а также предлагает новые теории, новые методы и основные ключевые технологии для достижения долгосрочной стабильности и переработки строительных материалов и конструкций.

Основными направлениями работы лаборатории являются исследования для снижения нагрузки на окружающую среду, функциональное проектирование и регулирование, исследования «поведения» материалов во время срока службы и принципы продления срока службы, а также переработка силикатных материалов для строительства.

Лаборатория занимает площадь 12 500 м<sup>2</sup> и оснащена профессиональным исследовательским оборудованием стоимостью более 100 миллионов юаней, образуя исследовательскую платформу, включающую восемь профессиональных вторичных лабораторий и один общественный экспериментальный центр. Исследовательская платформа имеет мощности для проведения исследований в области науки и техники теплового оборудования, цемента и вяжу-





щих материалов, бетона, стекла, керамики, пленок и покрытий, стеновых и дорожных материалов.

Лаборатория доступна как для китайских, так и для международных заявок и нацелена на внутренние и международные академические обмены и сотрудничество. На базе лаборатории была создана «Международная база научно-технического сотрудничества в области экологически чистых строительных материалов», которая в 2013 году была определена МНТК в качестве модели международной базы научно-технического сотрудничества.

Инновационные достижения научных исследований лаборатории вносят большой вклад в национальную экономику и социальное развитие, включая предоставление ключевой технической поддержки для строительства основной национальной инфраструктуры страны, стимулирование структурных преобразований и технологической модернизации традиционной промышленности строительных материалов, а также содействие внедрению стратегий энергосбережения и сокращению выбросов.

### Знакомство с журналом *Interdisciplinary Materials*

Научный журнал *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) был запущен Уханьским технологиче-

ским университетом совместно с John Wiley & Sons, Inc в декабре 2021 года.

*Interdisciplinary Materials* — это рецензируемый журнал открытого доступа с быстрой публикацией статей, фокусирующийся на междисциплинарных исследованиях между материаловедением и другими дисциплинами, такими как физика, химия, математика, механика, биология, энергетика, окружающая среда, информация, инженерия и т. д. Журнал стремится представлять информацию о передовых разработках в области науки и техники по всему миру.

Ожидается, что *Interdisciplinary Materials* будет использовать междисциплинарный, особый передовой и комплексный подход ко всем областям материаловедения, одновременно способствуя обмену идеями между учеными, занимающимися различными направлениями исследований. Аудитория журнала будет включать ученых-физиков, химиков, математиков, механиков, биологов, специалистов в области энергетики, окружающей среды, материаловедения, инженеров-теоретиков и практиков, а также политических деятелей.

Первый выпуск журнала вышел в свет в январе 2022 года. Журнал включен в базы данных *Emerging Sources Citations Index (ESCI)*, *Ei Compendex* и *Directory of Open Access Journals (DOAJ)*.

### Контактная информация

Уханьский технологический университет  
430070, Китай, провинция Хубей, г. Ухань,  
район Хуншань, 122 Луоши Роуд,  
Тел: 86-27-87884448; Факс: 86-27-87879466  
E-mail: sklwut@whut.edu.cn  
Контактные лица: Джао Сянг, Джоу Лихуа

R



Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-447-462>

CC BY 4.0

# Preparation of a complex organic-mineral additive based on phloroglucinol-furfural oligomers and silicon dioxide nanoparticles

Sergey A. Starchenko\* , Valentina A. Poluektova , Nikolay A. Shapovalov , Elizaveta P. Kozhanova 

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

\* Corresponding author: e-mail: sereja650@mail.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** The production of plasticizing additives using nanoparticles for the construction industry represents a promising sector in the development of advanced building materials. By incorporating nanoparticles, such as silicon dioxide, into complex additives, it is possible to significantly enhance the structural and mechanical characteristics of cement-based systems, resulting in increased strength, durability, and resistance to external forces. This study aims to investigate the process of synthesizing silicon dioxide nanoparticles in aqueous media and creating a complex organic-mineral additive comprising phloroglucinol-furfural oligomers with silicon dioxide nanoparticles. **Materials and methods of research.** A modifier based on phloroglucinol-furfural oligomers was used as an organic component of the complex additive. To synthesize silicon dioxide nanoparticles, which are the mineral component of the additive, liquid glass (sodium silicate solution) was used. Additionally, Aerosil, with a specific surface area of 2,000 m<sup>2</sup>/kg, was used as the dispersed phase in the organic mineral additive to study the compatibility of the components and the mechanism of their interaction. The particle and size distribution were determined using laser light diffraction on the Malvern Mastersizer 3000 device and dynamic light scattering on the Microtrac S3500 device. Microscopic analysis of the complex additive was performed on a TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope. The chemical structure and composition of the obtained additive were monitored by UV and IR spectrophotometry on Specord 200 Plus and Alpha Bruker Optics devices, respectively. **Results and discussion.** The article presents the results of the development of a method for the synthesis of silicon dioxide nanoparticles and creating an organic-mineral additive based on phloroglucinol-furfural oligomers containing these nanoparticles. The additive is designed for use in mineral suspensions in construction additive technologies. It has been shown that it is possible to obtain nanoscale particles of silicon dioxide through the hydrolysis of sodium silicate. It has been demonstrated that as the concentration of sodium silicate increases, the number of silica particles increases significantly, the number of silicon dioxide particles increases significantly. This leads to faster coagulation of the particles, resulting in the formation of larger aggregates. It has been shown that silicon dioxide particles smaller than 10 nm can be obtained through acid titration. During the maturation period, particles increase in size by about 7 times over a period of 1 to 7 days. The optimal ratio for particle synthesis should be considered to be a 2:1 ratio of reagent solutions (sodium silicate to hydrochloric acid) by volume. It is shown that the introduction of the specific additive at the stage of particle formation can help to stabilize their growth. **Conclusion.** The complex organic-mineral additive based on a phloroglucinol-furfural oligomer and silicon dioxide nanoparticles has been developed. It has been established that the introduction of the specific additive in the process of synthesis of silicon dioxide particles contributes to an increase in the aggregate stability of the dispersed system of the complex additive, reduces the tendency of particles to enlargement and sedimentation.

**KEYWORDS:** dispersed systems, nanomodification, aggregative stability, modifier, nanoparticles, silicon dioxide, SiO<sub>2</sub>, differential distribution, sol – gel method, coagulation.

**ACKNOWLEDGMENTS:** The research was carried out as part of the implementation of the Federal Program for universities support "Priority 2030" using equipment based in the High-Technology Center of BSTU named after V. G. Shukhov.

## FOR CITATION:

Starchenko S.A., Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Kozhanova E.P. Preparation of a complex organic-mineral additive based on phloroglucinol-furfural oligomers and silicon dioxide nanoparticles. *Nanotechnology in construction*. 2024; 16(5): 447–462. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-447-462>. – EDN: LWATIE.



## INTRODUCTION

The modern construction industry requires innovative solutions to enhance the performance of materials used in various construction projects. One such solution involves the use of complex organomineral additives with nanoparticles, such as silicon dioxide, which can improve the physical and mechanical properties of mineral mixtures. Nanoparticles play a crucial role in strengthening the coagulation structure, reducing cracking and increasing the durability of concrete. An important aspect of developing these additives is optimizing the process of structure formation and controlling the rheological properties of the cement system. This is essential for additive technologies and 3D printing.

Multifunctional (complex) additives in cement mixtures play a key role in building additive technologies due to their ability to enhance the rheological and mechanical properties of the mixture. These additives offer a range of benefits that allow you to regulate the fluidity, viscosity and plasticity of cement mixtures, which greatly facilitates the mixing and extrusion processes [1]. In view of this, the additives help to achieve a more even distribution of concrete ingredients, due to their peptizing property.

Based on the research conducted by the author [2], it is known that silicon dioxide nanoparticles increase cement hydration rate and contribute to the directive formation of consolidated permolecular structures of calcium silicate. These structures strengthen the cement matrix and, therefore, increase its strength.

According to the authors [3–7], the addition of silicon dioxide nanoparticles to mineral suspensions helps to eliminate structural defects in concrete due to the filling of micropores and microcracks with silicon dioxide particles. According to this, the strength characteristics of concrete increase, shrinkage and water absorption decrease, and frost resistance improves [8–9].

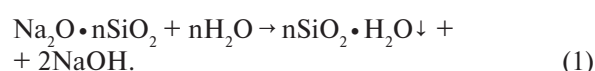
The use of silicon dioxide particles is justified by their ability to act as crystallization centers in the hydrosilicate phases of cement stone and to integrate into its structure due to their similar crystallochemical nature with calcium hydrosilicates [4, 9–10].

It is known [4] that the production of multifunctional (complex) additives using nanoparticles involves several processes: synthesis of a plasticizer, creation of nanoparticles, the mixing of active ingredients, and maturation of the final product.

Currently, two main methods are used to obtain nanoscale particles – dispersion and condensation [11–12]. In the first method, the main process is the grinding of coarsely dispersed materials with subsequent dispersion of the obtained particles. In the second method (sol – gel method), the main process of obtaining particles is a phase change or chemical transformation.

To obtain nanoscale particles of silicon dioxide by the sol – gel method, two directions are used: synthesis from organic substances and mineral substances, respectively. The main ongoing process is the hydrolysis of the substances used.

As a reagent for the synthesis of silicon dioxide particles, sodium liquid glass of the composition  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  is used, the anionic part of which consists of silicic acids of various polymerization [13–14]. Hydrolysis of an aqueous solution of sodium silicate proceeds according to the scheme [15–16]:



The interaction of a sodium silicate solution with solutions of mineral acids can be presented according to the scheme [13–14]:



However, it is difficult to accurately describe the scheme of the chemical reaction, since sodium silicate has a wide range of polymer transformations during the interaction [13–14].

This method allows the synthesis of silicon dioxide particles with sizes ranging from 5 to 50 nanometers. However, with optimized synthesis conditions and the use of specialized reagents, even smaller particles can be obtained [4, 17, 18]. However, it is worth noting that the exact size and distribution of the particles may vary depending on experimental conditions and analysis methods.

According to the research [4, 9], and [19–20], it is possible to produce silicon dioxide particles of sizes ranging from 2 nanometers in laboratory conditions. To synthesize nanoscale silicon dioxide particles, the researchers used the titration of 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solution with 0.1 M HCl solution and the subsequent maturation of the resulting particles, as described in [9] and [19–20].

The aim of this study is to develop a method for obtaining silicon dioxide nanoscale particles in an aqueous medium, to study their aggregative stability for further production of a multifunctional (complex) organic-mineral additive.

## METHODS AND MATERIALS

As the organic component of an additive, we used a modifier based on phloroglucinol-furfural oligomers, which was synthesized by the authors using the polycondensation method (hereinafter referred to as a specific additive) [21].

Sodium liquid glass was used to obtain nanoscale silicon dioxide particles (the mineral component of an additive).



To test the stability of sodium silicate solutions, aqueous solutions of sodium silicate with different concentrations were prepared: 1, 4, 7 and 10%, respectively. Particle sizes in freshly prepared sodium silicate solutions were determined by a laser light diffraction on a Malvern Mastersizer 3000 device. Purified water was used as a dispersion medium, and particle size measurement was carried out at a speed of 2000 rpm using a red laser (wavelength 632.8 nm) and a blue light source (wavelength 470 nm). The data was processed statistically using the device's software based on the Mie theory. The average particle size was determined as the median of the integral distribution, namely  $D(x)_{50}$ .

A modified sodium silicate solution was used as a base for the growth of silicon dioxide particles. 11.8 grams of 42.5% sodium liquid glass was placed in a 500 ml flask and dissolved in 493 ml of water. The flask containing the solution was heated at a temperature of 90 °C for two hours. After that, the solution was cooled and settled at a temperature of 25 °C for one day. Then, the solution was decanted and filtered under rarefied air through a nylon membrane filter with a pore size of 0.45 microns. A hydrochloric acid solution was used as a neutralizer solution. Since hydrochloric acid is a precursor, the solution has been prepared from fixanals.

To study the effect of a specific additive in the composition of the complex additive as an anticoagulant of the dispersed phase, we used extra research with Aerosil 200 (colloid silicic acid) – colloidal silicon dioxide according to GOST 14922-77 with a specific surface area equal to 2000 m<sup>2</sup>/kg [22]. Mineralogical composition, weight. %: SiO<sub>2</sub> – 99.8. For the research 20 ml of purified water was poured to an Aerosil suspension weighing 100 mg, carefully suspended on a vortex-type mixing device and the particle size distribution was measured by a laser light diffraction method. After that, an aliquot of the specific additive was added to the solution so that the concentration was 0.2% and the solution was slowly mixed to eliminate mechanical effects on the agglomerates. Then the particle distribution was measured. After measurement, the sample with the specific additive was treated with ultrasound in an Elmasonic S150 ultrasonic bath at a frequency of 37 kHz for one minute.

To study the kinetics of silicon dioxide particles sizes in the presence of the specific additive, the following concept was used: a modified sodium silicate solution with the specific additive of various concentrations was prepared: 0.2, 0.5 and 1.0%. Then the synthesis of silicon dioxide particles was carried out. 50 ml of 0.1 M hydrochloric acid solution was added to the prepared modified solutions with different concentrations of the specific additive at a rate of 5 ml /min, while stirring the solutions at a speed of 500 rpm. The obtained samples were thermostated at a temperature of 25 °C for maturing the particles for 7 days.

The particle size distribution and aggregative stability were determined by two different methods:

1) By the laser light diffraction method on the Mastersizer 3000 device, Malvern. Water was used as a dispersing medium, and measurements were taken at a speed of 2,000 rpm. The data was processed statistically using the device's software based on the Mie theory;

2) By the method of dynamic light scattering on the Microtrac S3500 device. Water was used as a dispersing medium. The data was processed statistically using the Microtrac FLEX device's software.

Microscopic analysis of the complex additive was performed on a TESCAN MIRA 3 LMU electron scanning microscope, which has a Schottky cathode with field emission used to obtain high-resolution images with high brightness, contrast and low noise.

The chemical structure and composition of the synthesized additive were monitored by UV and IR spectrophotometry using Specord 200 plus device manufactured by Analytik Jena, and Alpha device manufactured by Bruker Optics.

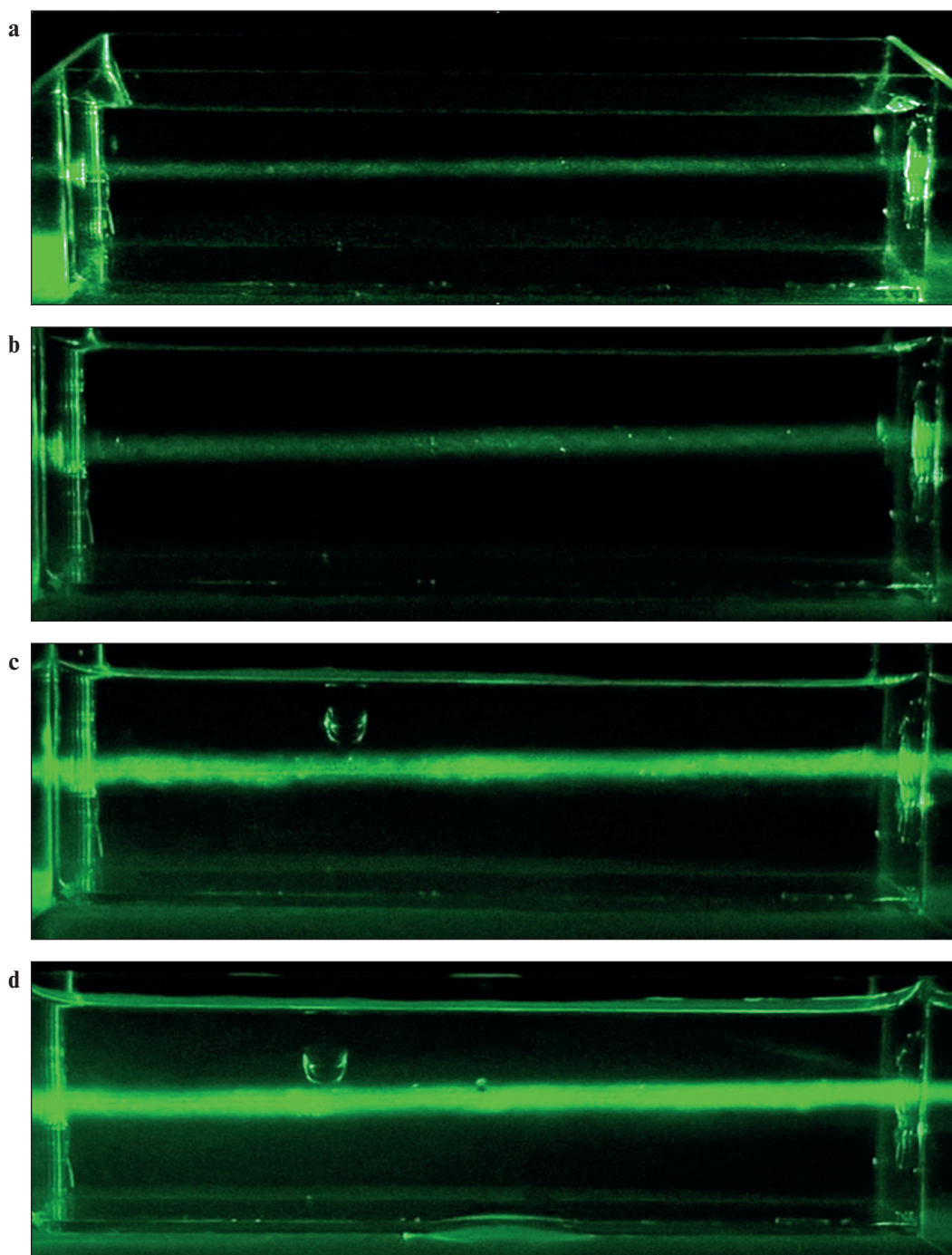
## RESULTS AND DISCUSSION

During the preparation of sodium silicate solutions with various concentrations, we noticed that the solutions exhibited different degrees of opalescence (see Fig. 1). At the same time, with an increase in the concentration of sodium silicate, the degree of opalescence also increased, indicating an increase in aggregates of silicon dioxide particles. To confirm the growth of silicon dioxide particles as a result of hydrolysis of a soluble salt, we studied the kinetics of the aggregation of silicon dioxide particles in solutions with different concentrations of sodium silicate using laser light diffraction on the Malvern Mastersizer 3000 device.

According to the data obtained (see Fig. 2), it has been revealed that during the hydrolysis of a sodium silicate solution, the particles of silicon dioxide are coagulating with forming large aggregates. With an increase in the concentration of sodium silicate, the hydrolysis process is significantly enhanced, which contributes to an increase in the rate of coagulation of particles. It has been established that sodium silicate solutions are subject to strong hydrolysis, as a result of which large aggregates of silicon dioxide are formed, which means that the system does not have aggregative stability.

To confirm the aggregative stability, sodium silicate solutions with different concentrations were heated at a temperature of 90 °C for two hours. After that, the solutions were cooled and left to settle at a temperature of 25 °C for one day. Over time, it was found that all the solutions were transparent (had no opalescence) and with a white, amorphous sediment at the bottom. Due to this, it was determined that the temperature had violated the thermodynamic stability of the system. As a result, ag-





**Fig. 1. Images of aqueous solutions of sodium silicate with different degrees of opalescence:**  
a) 1% solution; b) 4% solution; c) 7% solution; d) 10% solution

gregates with a significant mass were formed, leading to a loss of sedimentation stability, and, as a result, the system was divided into two phases: a dispersion medium and a sediment.

Based on the data obtained, it is found that in order to obtain nanoscale particles, it is necessary to modify the sodium silicate solution to prevent coagulation of dioxide particles to exclude the formation of large aggregates.

To slow down the growth of aggregates, the effect of a phloroglucinol- furfural modifier (specific additive) on silicon dioxide particles (aggregates) was studied in order to increase the aggregate stability of a system with silicon dioxide particles.

For the research, we prepared a 1% aqueous solution of sodium silicate and measured the particle size distribution with laser light diffraction. After that, we added an



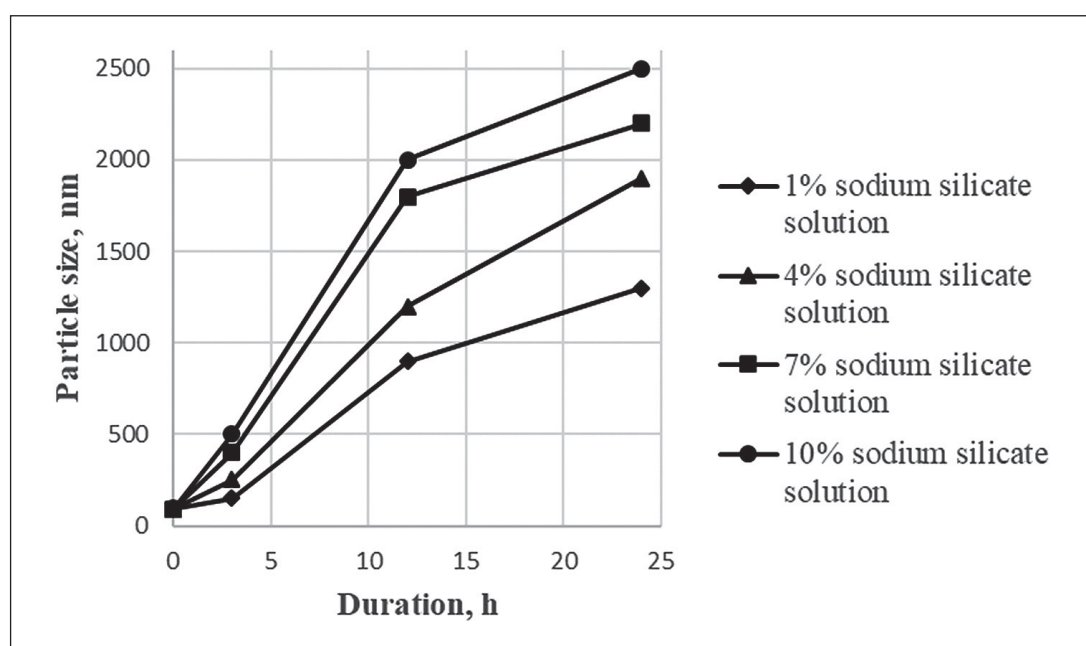


Fig. 2. Formation kinetics of silicon dioxide particles aggregates

aliquot of the specific additive to the solution so that the concentration was 0.2%. Then we slowly mixed the solution to eliminate any mechanical effects on the aggregates. After that, we measured the particle size distribution. The volume of distribution curves of the silicon dioxide particle size before and after the introduction of the specific additive are shown in Figure 3.

The results showed that in the initial sample, the average particle size was about 102 nm, and after introducing the specific additive, some of the particles decreased to 71 nm.

Thus, the addition of a specific additive (at a concentration of 0.2% in the solution) caused the peptization of the aggregates, breaking them down into smaller particles, resulting in a bimodal particle distribution (see Fig. 3 b).

To confirm the effect of the specific additive as an anticoagulant, the study was performed on amorphous synthetic silica Aerosil 200, with a specific surface area of about 200 m<sup>2</sup>/g.

The results of the study showed that in the initial suspension of Aerosil, most of the particles were approximately 430 nanometers in size. After the addition of a specific additive, the particles' sizes decreased to 117 nanometers. After ultrasonic treatment of the Aerosil suspension with the additive, the particle size reduced to approximately 43 nanometers, and the distribution changed from bimodal to monomodal (see Fig. 4 b and 4 c). This indicates the complete breakdown of large aggregates.

Based on the research done, it has been found that the specific additive promotes the peptization of particles. The effect of ultrasound allows for complete particle dispersion with the formation of nanoscale particles.

Subsequently, the acid titration method was used to obtain silicon dioxide nanoparticles. A modified sodium silicate solution was used as a system for particle growth, and hydrochloric acid was used as a titrant solution.

The synthesis of silicon dioxide nanoparticles with acid titration method was carried out according to the research plan presented in the Table 1.

The titrant solution was supplied at a predetermined rate using a peristaltic pump. The synthesis of nanoparticles was carried out at room temperature. After the synthesis, the resulting solutions were stored for up to 7 days.

According to the data obtained, it can be seen that after one day, the growth of sol particles of silicon dioxide has begun. In test sample 1, where the volumes of solutions were mixed in an equimolar ratio (1:1 rpm), most of the particles were 14 nm in size (Fig. 5 a), in test sample 2, where the volumes of the solutions were mixed in a ratio of 2:1 rpm (silicate : acid) some of the particles were 9 nm in size (Fig. 5 b), and in test sample 3, where the acid concentration was 2 times higher, some of the particles were 10 nm in size (Fig. 5 c). It should be noted that no particles were detected in three samples immediately after synthesis.

Based on the obtained data on the dependence of the sol size of silicon dioxide particles on the maturation period (Fig. 6), we can see that as maturation time increases, the particles increase in size. In test sample 1, most of the particles were 14 nanometers in size after 1 day, and 83 nm after 7 days. In test sample 2, most of the particles were 9 nm in size after 1 day, and 68 nm after 7 days. In test sample 3, most of the particles were 10 nm in size after 1 day, and 72 nm after 7 days. After 7 days of maturation



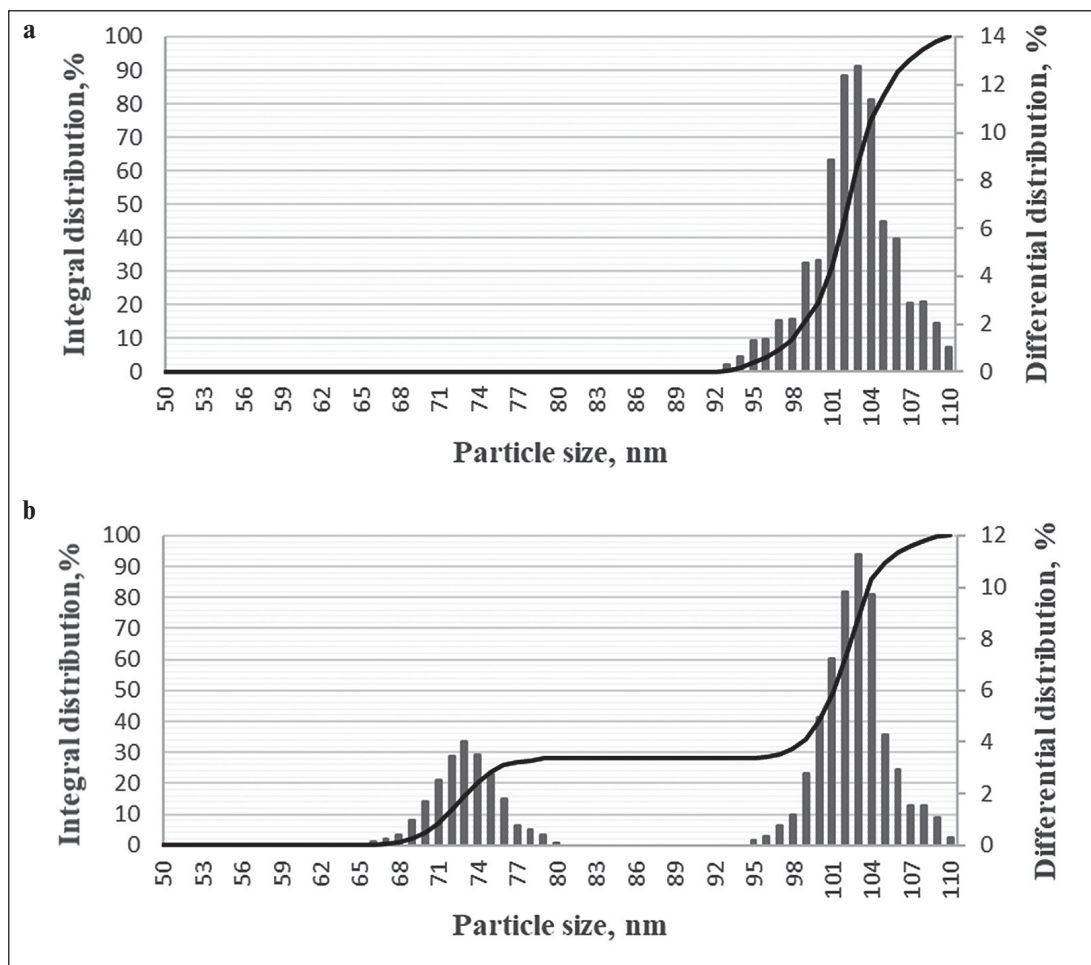


Fig. 3. Volume of distribution curves for the size of silicon dioxide particles: a) before the introduction of the specific additive; b) after the introduction of the specific additive

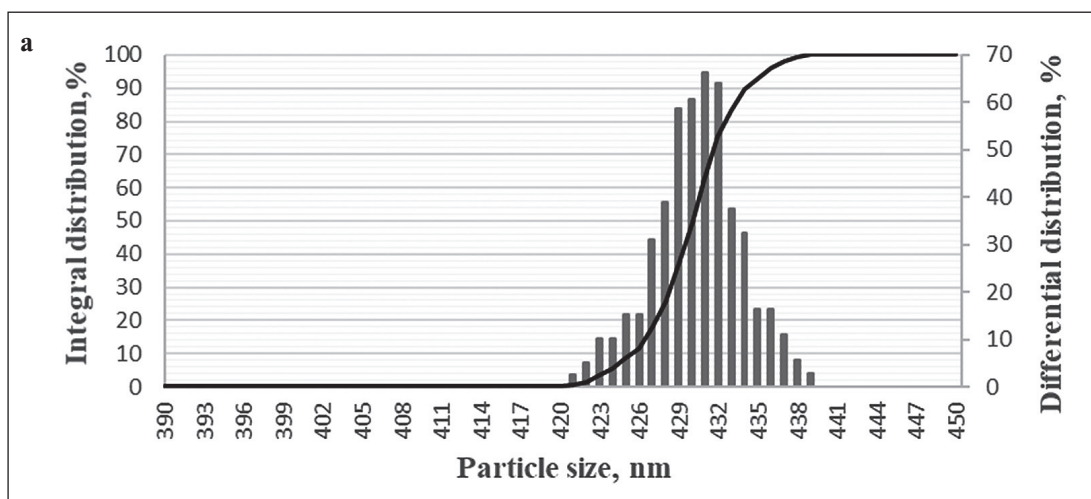


Fig. 4. Volume of distribution curves of Aerosil aggregates: a) before introduction of the specific additive; b) after introduction of the specific additive; c) after introduction of the specific additive and ultrasound treatment



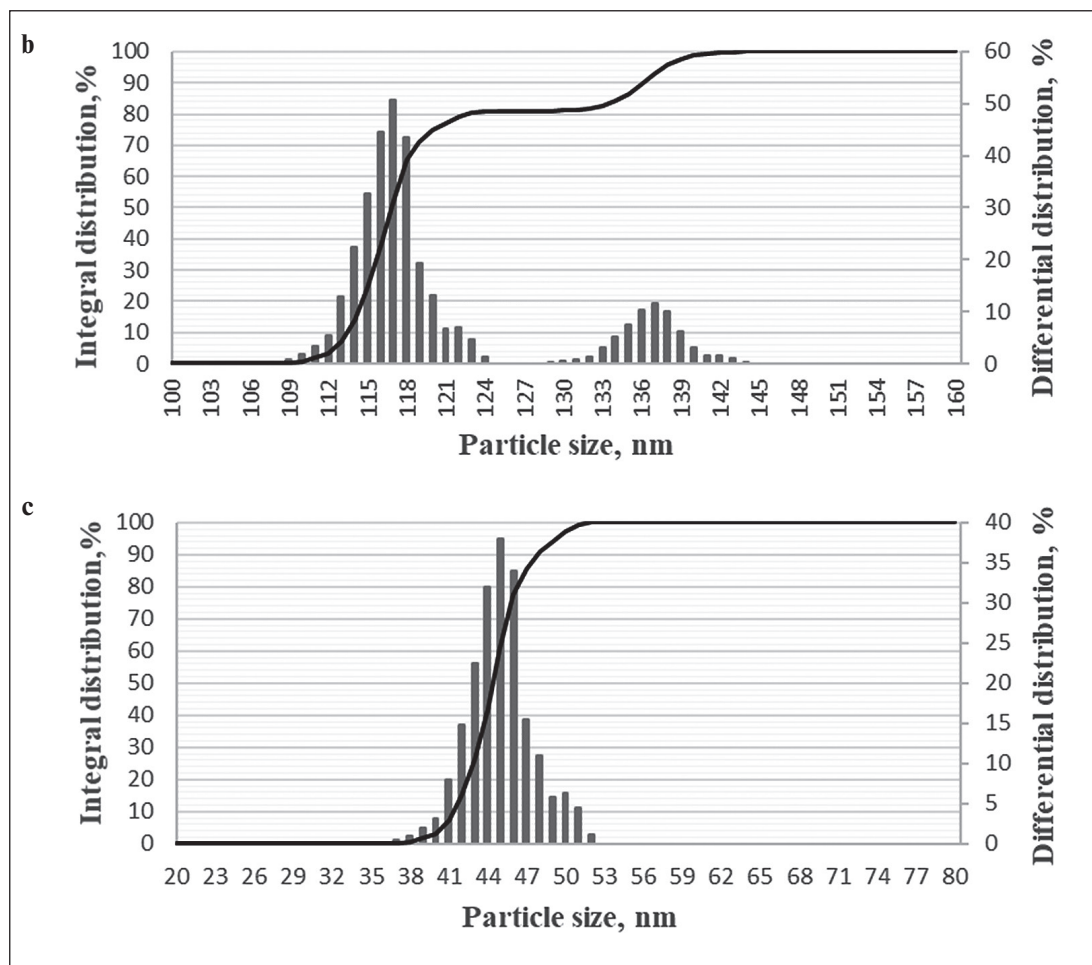


Fig. 4. The End

Table 1

Research plan for the synthesis of silicon dioxide nanoscale particles

Parameter	The samples		
	Test sample No. 1	Test sample No. 2	Test sample No. 3
Mixing speed, rpm	500		
HCl addition rate, ml/min	5		
Volume of the modified $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ solution, ml	100		
Synthesis temperature, °C	25		
Concentration of the modified $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ solution, mol/l	0,1		
HCl volume, ml	100	50	25
Concentration, mol/l	0,1	0,1	0,2
The period of particle size measurement	Freshly made, after 1 day, 2 days, 3 days, 4 days, 5 days, 6 days, 7 days		



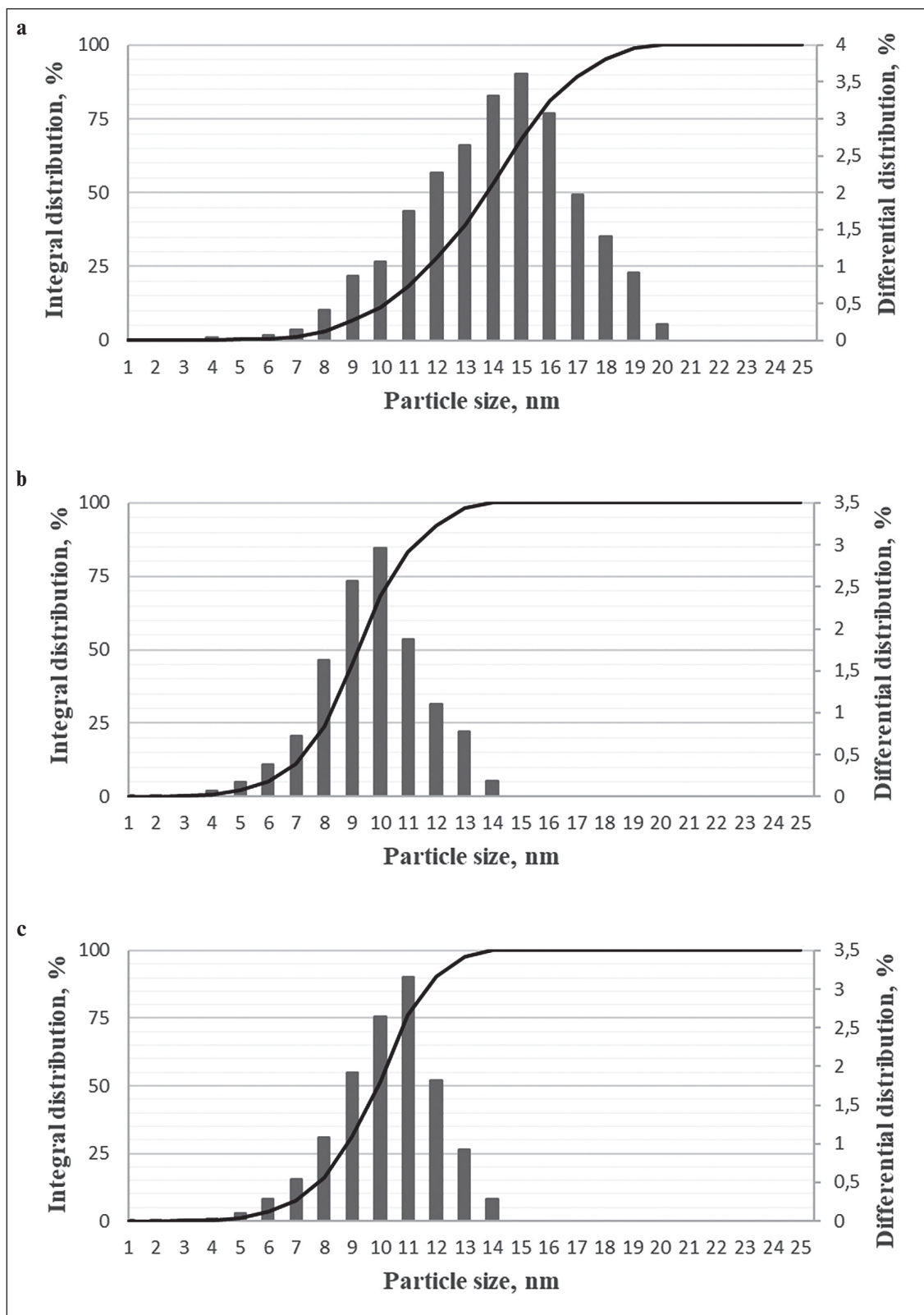


Fig. 5. Volume of distribution curves of silicon dioxide particles after one day: a) test sample № 1; b) test sample № 2; c) test sample № 3



in all test samples, a slight opalescence was observed, indicating continued particle growth.

The results of studying the growth kinetics of the silicon dioxide particles obtained through acid titration in the presence of the specific additive with different concentrations are presented in Figure 7.

As can be seen in Figure 7, the specific additive at a concentration between 0.2% and 1.0% stabilizes the growth of particles, slowing down the coagulation process. Over the maturation period, the average particle size has increased by a factor of 2.5, which is a relatively small increase for nanoparticles. Figure 8 shows the differential

distribution of silicon dioxide particles with the specific additive at 1% concentration after one day and after seven days of maturation.

Based on the particle distribution data obtained, after one day of maturation, most particles were 7 nm in size, as confirmed by a narrow monomodal distribution. After 7 days of maturation, the particle size increased to 20 nm, while the particle distribution had a bimodal appearance, indicating the formation of aggregates.

Studies have shown that the introduction of the specific additive during the particle synthesis process can help stabilize the growth of particles. Based on the previous

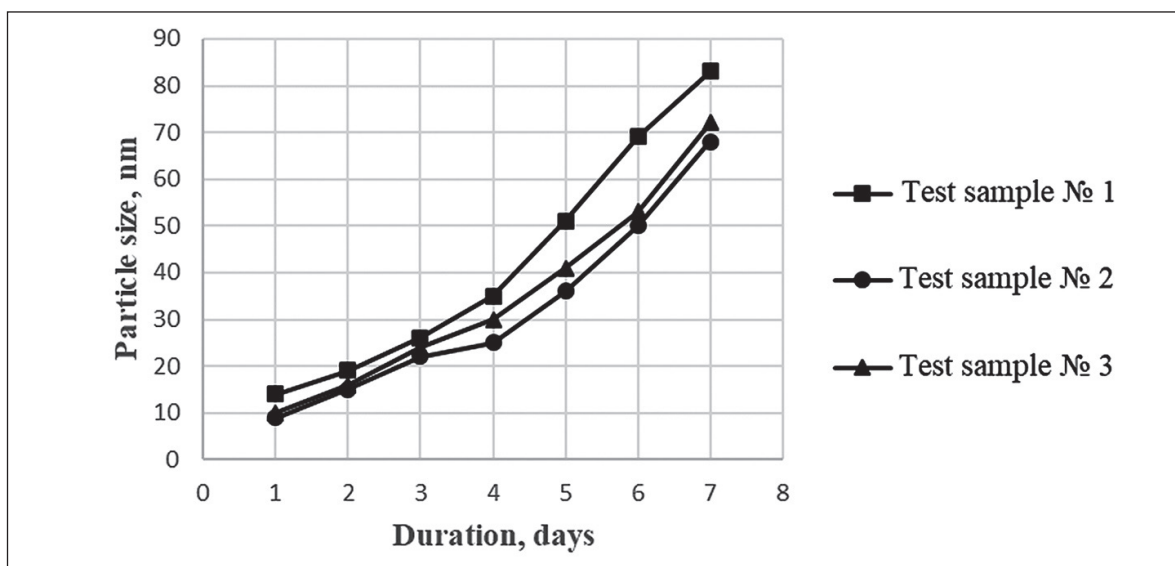


Fig. 6. Graph of the relationship of the sol size of silicon dioxide particles on the maturation period

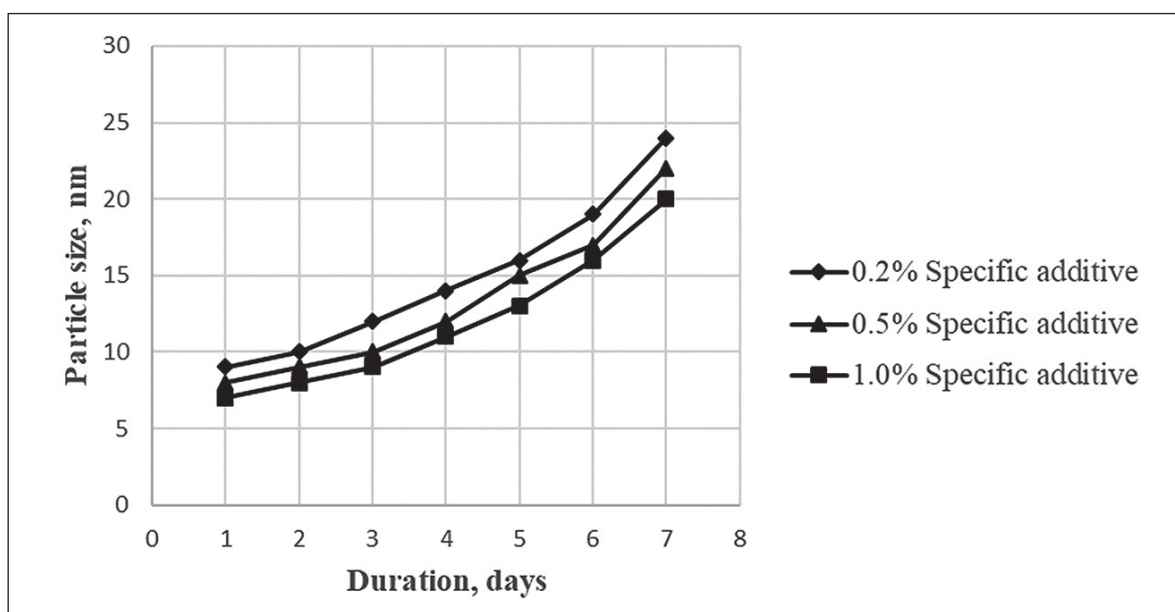


Fig. 7. Relationship of the particle size distribution of silicon dioxide on the maturation period and the concentration of the specific additive



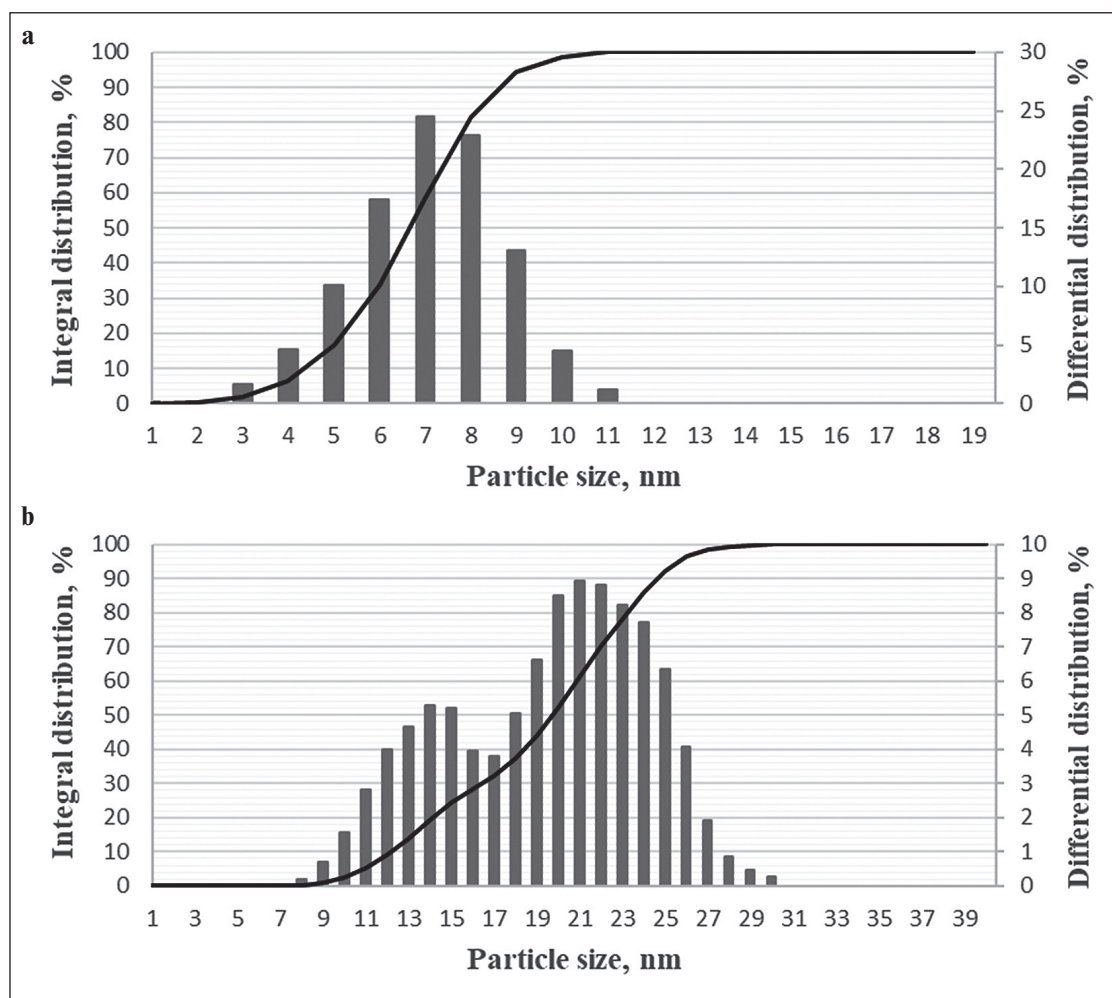


Fig. 8. Change in the differential distribution of silicon dioxide particles with a specific additive (1%) over time: a) after one day; b) after seven days

research [25–27], it is believed that the adsorption of these specific molecules onto the surface of the particles could occur. This process reduces the surface tension at the solid boundary – dispersion phase, which in turn reduces the ability of the particles to aggregate.

Based on the presented research results, we have developed a method for obtaining a complex organic-mineral additive. The main stages of this process are described below:

Before the synthesis of the specific additive, 50% by weight of a modified sodium silicate solution has been added to a phloroglucin solution. The synthesis of the additive was then carried out under optimal conditions.

For the synthesis of silicon dioxide nanoparticles, the chemical equilibrium in the solution was shifted by applying a hydrochloric acid solution at an optimal rate. The maturation of silicon dioxide nanoparticles was carried out at a temperature of 25°C for 3 days.

The composition of the resulting complex organic-mineral additive was monitored by UV and IR spectroscopy

immediately after synthesis. The IR spectrum and UV spectrum of the synthesized complex organic-mineral additive are presented in Figure 9.

Based on the results of UV and IR spectroscopy, it can be concluded that the addition of sodium silicate at the synthesis stage does not affect the chemical structure of the specific additive.

The particle size of silicon dioxide in the complex organic-mineral additive was approximately 7 nanometers after 3 days of maturation. The volume of distribution curve of silicon dioxide particles in the complex organic-mineral additive after 3 days of maturation is presented in Figure 10.

To visualize silicon dioxide particles in synthesized complex organic-mineral additive, the additive was applied to a conductive plate in a thin layer and dried at a temperature of 105°C, after which micrographs were taken on the TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope (see Fig. 11).

The micrograph clearly shows a large number of white inclusions, which consist of silicon dioxide par-



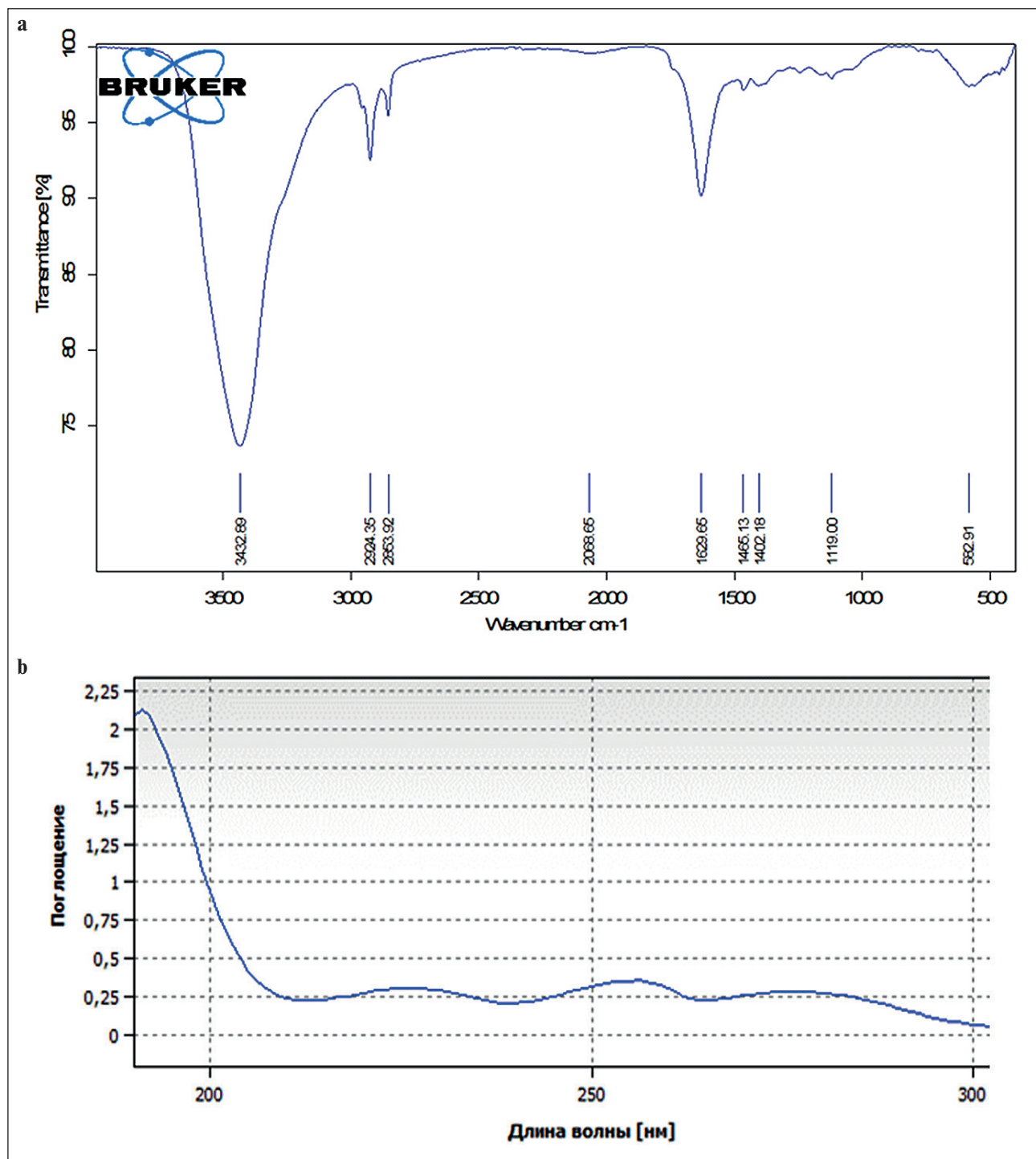


Fig. 9. Spectra of the synthesized complex organic-mineral additive: a) IR spectrum; b) UV spectrum

ticles, which is confirmed by the local elemental spectrum performed using the TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope (see Fig. 12).

It has been established that nanoscale particles of silicon dioxide are present in the composition of the complex organic-mineral additive. At the same time, the specific additive performs two key functions: it stabilizes the pro-

cess of growth of silicon dioxide particles and promotes uniform particle distribution throughout the entire volume of the complex additive.

As a result of the research, a patent of the Russian Federation for the invention No. 2806395 “Complex additive for concrete in construction with 3D printing” was granted [28].



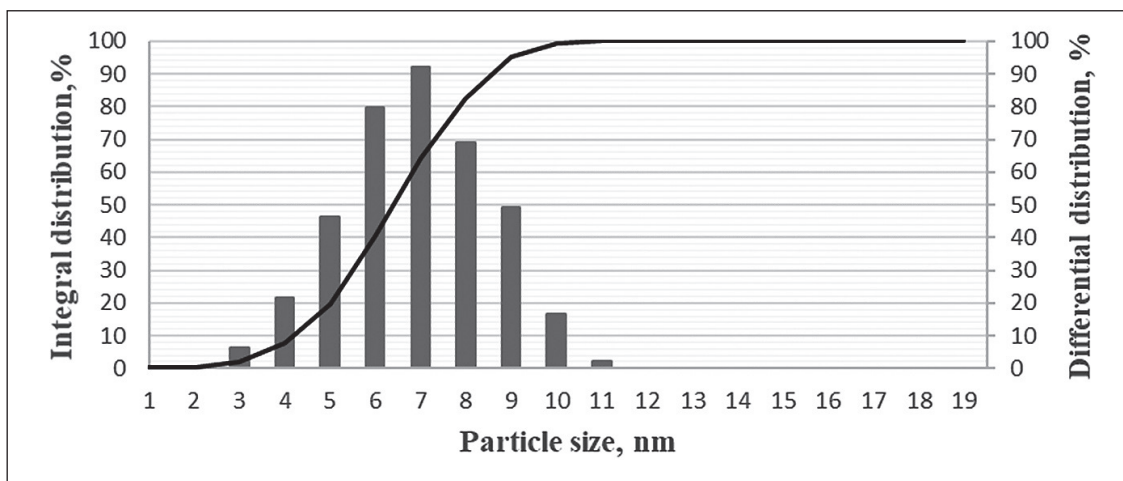


Fig. 10. The volume of distribution curve of silicon dioxide particles in a complex organic-mineral additive after 3 days of maturation

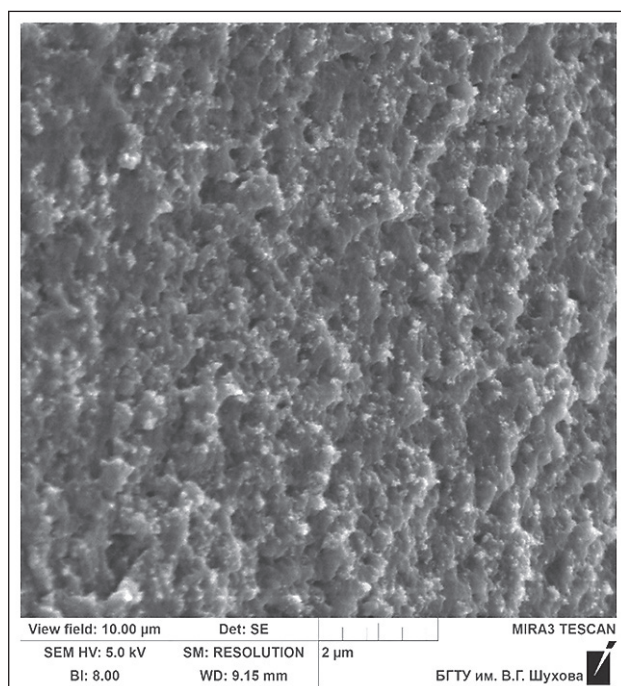


Fig. 11. Microstructure of the complex organic-mineral additive

For drying a complex organic-mineral additive, a vacuum drying method was tested at a temperature of 40°C. Micrographs of the complex organic-mineral additive dried in vacuum at a temperature of 40°C are presented in Figure 13.

As can be seen, large particles of silicon dioxide are present in the layer of the complex additive. This is due to the fact that moisture was evaporating slowly during the drying process, thereby increasing the concentration and, as a result, active particle growth occurred (The drying time was 2 hours).

In a further study, the additive was dried by spraying a solution of the complex additive at a temperature of

60°C. The micrograph of the spray-dried complex organic-mineral additive at a temperature of 60°C is presented in Figure 14.

It can be seen that the particles are small and are not enlarged. It should be noted that this method is technically difficult to implement in a laboratory setting, as the dust formed from the particles of the dried additive can be difficult to capture and fix.

The drying of the complex organic-mineral additive in a vacuum proved to be ineffective, due to the significant enlargement of silicon dioxide particles. When drying the complex organic-mineral additive by spraying, there was no significant particle growth, the plasticizing ability and



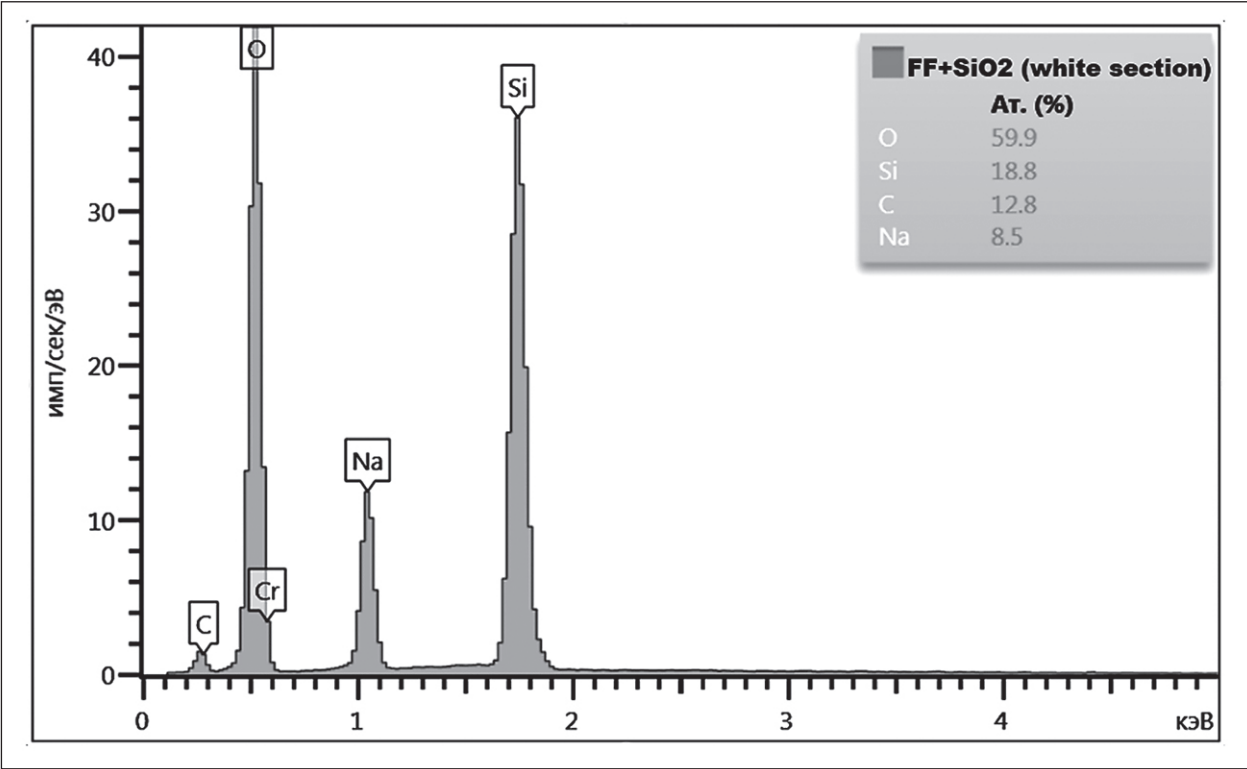


Fig. 12. The local elemental spectrum of the complex specific additive

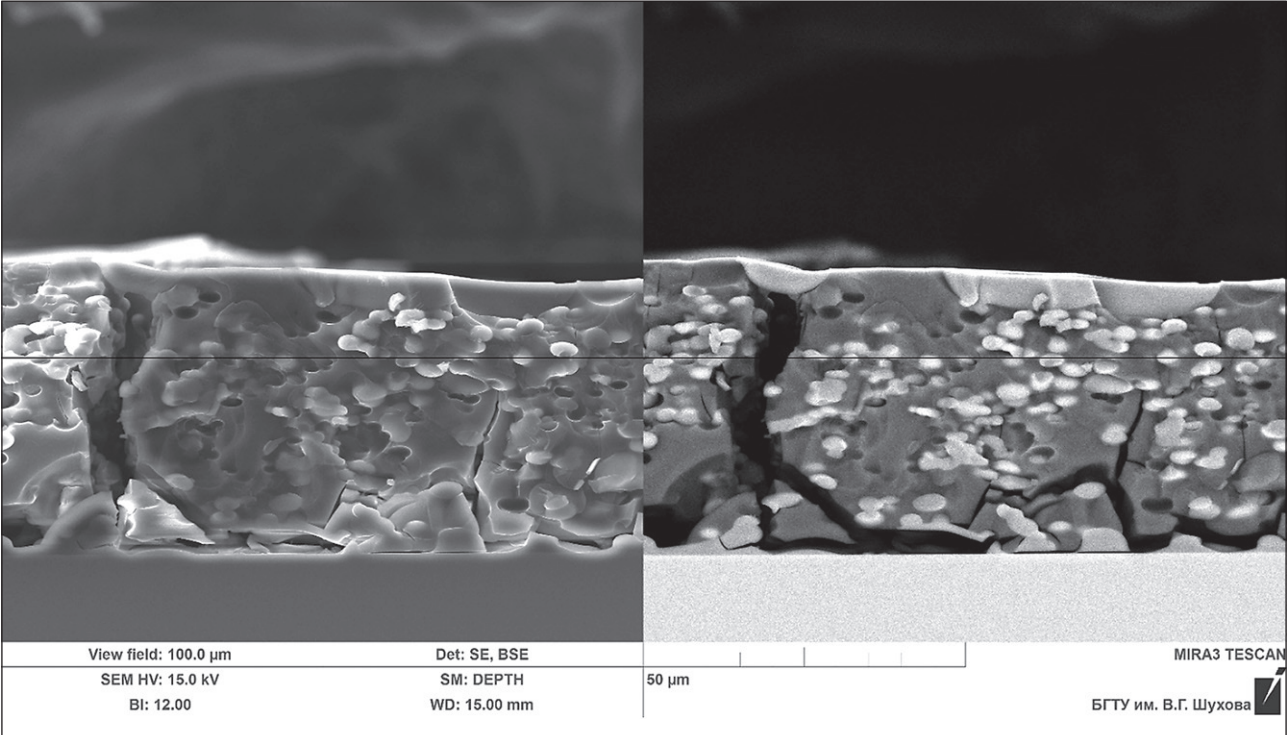


Fig. 13. Micrographs of the vacuum-dried complex organic-mineral additive at a temperature of 40°C



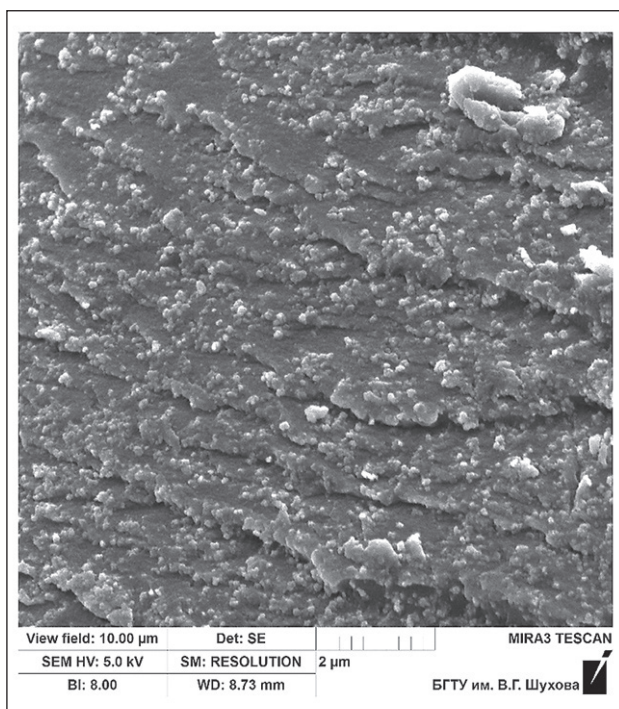


Fig. 14. Microstructure of the complex organic-mineral additive dried by spraying at a temperature of 60°C

activity of the additive remained unchanged. Therefore, spray drying at a temperature of 60°C can be considered an effective method.

## CONCLUSION

It has been established that nanoscale particles of silicon dioxide can be obtained by hydrolysis of sodium silicate. As the concentration of sodium silicate increases, the number of silicon dioxide particles also increases significantly. This leads to rapid coagulation of particles, forming large aggregates. An increase in temperature causes rapid growth of aggregates, as a result they are precipitating out of solution.

It has been proven that the acid titration method is suitable for obtaining of silicon dioxide particles with a size less than 10 nm. During the maturation period from 1 to 7 days, the particle size increases approximately by 7 times. The optimal ratio for particle synthesis is considered to be the ratio of the reagent solutions of 2:1 by volume (sodium silicate to hydrochloric acid).

The complex organic-mineral additive based on a phloroglucinol-furfural oligomer and silicon dioxide nanoparticles has been obtained.

It has been found that introduction of the specific additive at the stage of synthesis of silicon dioxide nanoparticles helps to stabilize the growth of the particles, reducing their tendency to aggregate.

An effective drying process for the complex organic-mineral additive has been determined by spraying it at a temperature of 60°C. This process prevents the significant growth of silicon dioxide particles, and the plasticizing ability and activity of the additive remain unchanged.

## REFERENCES

1. Chindaprasirt R. Effect of Cenospheres on the Performance of Various Cement Composites / R. Chindaprasirt. Journal of Materials in Civil Engineering. 2009; 21(9):480–487.
2. Hewlett P. Lea's Chemistry of Cement and Concrete / Peter Hewlett. Ed Butterworth-Heinemann. UK: Elsevier; 2003.
3. F. Sanchez, K.Sobolev. Nanotechnology in concrete. A review. Construction and Building Materials. 2010; 24: 2060–2071.
4. Synthesis of nanomodifying additives for the technology of building composites: monograph / O.V. Artamonova; Voronezh GASU. Voronezh, 2016.
5. Kaprielov S.S. The influence of the structure of cement stone with additives of silica and superplasticizer on the properties of concrete / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, Yu.R. Krivoborodov. Concrete and reinforced concrete. 1992; 7: 4-7.
6. Korolev A.S. Fine-grained concretes with nanoadditives of synthetic zeolite / A.S. Korolev, E.S. Khakimova. Concrete and reinforced concrete. 2008; 6: 13
7. Korotkikh D.N. On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes / D.N. Korotkikh, O.V. Artamonova, E.M. Chernyshev. Nanotechnology in construction. 2009; 2: 42-49.
8. Komokhov P.G. High-strength concrete based on nanotechnology elements using the sol-gel method / P.G. Komokhov, L.B. Svatovskaya, V.Ya. Solovyova, A.M. Sycheva. Materials of the IX academic readings of the Russian Academy of Sciences, Penza: Publishing House of PGUAS 2006; 8-10.
9. Artamonova O.V. Technology of nanomodification of the structure of inorganic hardening systems of building composites: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.23.05. Voronezh; 2018.



10. Taylor X. Chemistry of cement / X. Taylor; translated by A.I. Baykova, T.V. Kuznetsova. M.: Mir; 1996.
11. Pomogailo A.D. Metal nanoparticles in polymers / A.D. Pomogailo, A.S. Rosenberg, I.E. Uflyand. M.: Khimiya; 2000.
12. Korolev E.V. Basic principles of practical nanotechnology in building materials science. Scientific internet-journal Nanotechnology in construction. 2009;1:66–79.
13. Lukash E.V., Shalukho N.M., Kachurina V.S. Preparation and investigation of properties of anhydrous sodium metasilicate. Proceedings of BSTU. Ser. 2. Chemical technologies, biotechnologies, geoecology. 2022; 2 (259):56–63.
14. Liquid glass. Preparation, composition, structure and properties: method. instructions for laboratory work / N.V. Shalneva, O.V. Ageikina; Tyumen Industrial University V. 1<sup>st</sup> ed. Tyumen: BIC Publishing Center: TIU; 2016.
15. Shabanova N.A. Chemistry and technology of nanodisperse oxides: a textbook / N.A. Shabanova, V.V. Popov, P.D. Sarkisov. M.: IKTS Akademkniga; 2006.
16. Jeffrey Brinker, C. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing / C. Jeffrey Brinker, W. Scherer. George: Academic Press; 2013.
17. Chaudhuri, R.G. Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications / R.G. Chaudhuri, S. Paria. Chemical reviews. – 2012. – T. 4, № 112. – C. 2373–2433.
18. Kumar, A., Vyas, V., Pathak, A., Kumar, P. Colloidal Chemistry Aspects of Nanotechnology. In Applications of Nanotechnology – 2021. – C. 49–64
19. Artamonova O.V., Sergutkina O.R., Korotkov D.N., Chernyshov E.M. Sol-gel synthesis of nanoscale SiO<sub>2</sub> particles for modifying the structure of cement stone. Nanotechnology in construction. 2010; 1: 97–105.
20. Artamonova O.V., Sergutkina O.R., Ostankova I.V., Shvedova M.A. Synthesis of a nanodisperse modifier based on SiO<sub>2</sub> for cement composites. Condensed media and interphase boundaries. 2014; 16 (1): 152–162.
21. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A. Regulation of the aggregate stability for binary polymer-mineral dispersions. Nanotechnologies in Construction. 2023; 15(3): 258–266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>. – EDN: EHKULB.
22. Shapovalov N.A., Poluektova V.A., Malinovker V.M., Krainiy A.A., Gorodov A.I. Regulation of aggregative stability and rheological properties of CaCO<sub>3</sub> dispersions by an additive based on pyrocatechin production waste. Fundamental research. 2015;2-5:948–952.
23. Poluektova V.A. Regularities of surface phenomena and modification of polymer-mineral dispersions for additive technologies: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 02.00.11. Belgorod: BSTU; 2021.
24. Starchenko S.A. Improvement of the technology for obtaining a superplasticizing agent based on 1,3,5-trihydroxybenzene-2-furaldehyde oligomer used for the immobilization of radioactive and toxic waste. Belgorod: BSTU; 2020.
25. Slyusar A.A., Poluektova V.A., Mukhacheva V.D. Colloidal and chemical aspects of plasticization of mineral suspensions with oxyphenolfurfural oligomers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2008; 2:66–69.
26. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Balyatinskaya L.N. Adsorption of oxyphenolfurfural oligomers on dispersed materials. Fundamental research. 2012; 6(11):1470–1474.
27. Poluektova V.A., Kozhanova E.P., Kudina A.E. Adsorption of phloroglucinifurfural oligomers on the surface of polymermineral dispersions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017;10: 116–122. [https://doi.org/10.12737/article\\_59cd0c61195958.39964053](https://doi.org/10.12737/article_59cd0c61195958.39964053)
28. Complex additive for concrete construction 3D printing: pat. 2806395 Ros. Federation / Poluektova V.A., Starchenko S.A., Kozhanova E.P.; applicant and patent holder of V.G. Shukhov BSTU. Application no. 2023113979; application no. 05.29.2023; publ. 10.31.2023. Issue no. 31.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey A. Starchenko** – Postgraduate student, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, sereja650@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4827-8322>

**Valentina A. Poluektova** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, val.po@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8998-0698>

**Nikolay A. Shapovalov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, shap.bstu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4624-3385>



**Elizaveta P. Kozhanova** – Postgraduate student, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, elizzinchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0112-0584>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**S.A. Starchenko** – conducting the experimental part of the study; writing the source text; analyzing the results of the study.

**V.A. Poluektova** – scientific guidance; setting research goals and objectives; analysis of research results.

**N.A. Shapovalov** – research concept; analysis of research results.

**E.P. Kozhanova** – conducting the experimental part of the study.

#### The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 05.09.2024; approved after reviewing 01.10.2024; accepted for publication 08.10.2024.



Научная статья

УДК 544.7

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-447-462>

CC BY 4.0

## Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния

Сергей Александрович Старченко\* , Валентина Анатольевна Полуэктова ,  
Николай Афанасьевич Шаповалов , Елизавета Петровна Кожанова 

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sereja650@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Получение пластифицирующих добавок с наночастицами для строительной индустрии является перспективным направлением в развитии современных строительных материалов. Использование наночастиц, таких как диоксид кремния, в составе комплексных добавок позволяет существенно улучшить структурные и механические свойства цементных систем, повышая их прочность, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Данное исследование направлено на изучение процесса получения наночастиц диоксида кремния в водных средах и на получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров с наночастицами диоксида кремния. **Материалы и методы исследования.** В качестве органической составляющей комплексной добавки использовали модификатор на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров. Для синтеза наночастиц диоксида кремния (минеральной составляющей добавки) использовали жидкое стекло (раствор силиката натрия). Для изучения совместимости компонентов и механизма их действия дополнительно в качестве дисперсной фазы органоминеральной добавки использовали Аэросил с удельной поверхностью, равной 2000 м<sup>2</sup>/кг. Распределение частиц и их размер определяли методом лазерной дифракции света на приборе Malvern Mastersizer 3000 и методом динамического рассеивания света на приборе Microtrac S3500. Микроскопический анализ комплексной добавки проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU. Контроль химического строения и состава получаемой добавки проводили методом УФ- и ИК- спектрофотометрии на приборах Specord 200 plus и Alpha Bruker Optics соответственно. **Результаты и обсуждение.** В статье изложены результаты разработки метода синтеза наночастиц диоксида кремния и создания комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров с содержанием наночастиц диоксида кремния. Добавка предназначена для использования в минеральных суспензиях, применяемых в строительных аддитивных технологиях. Установлено, что методом гидролиза силиката натрия возможно получать наноразмерные частицы диоксида кремния. Показано, что с увеличением концентрации силиката натрия значительно увеличивается количество частиц диоксида кремния, что способствует более быстрой коагуляции частиц с образованием крупных агрегатов. Показано, что методом кислотного титрования можно получать частицы диоксида кремния размером менее 10 нм. В период созревания частиц с 1 до 7 суток происходит увеличение размеров частиц примерно в 7 раз. Оптимальным соотношением для синтеза частиц следует считать соотношение растворов реактивов 2:1 об/об (силиката натрия к соляной кислоте). Показано, что введение индивидуальной добавки на стадии синтеза частиц позволяет стабилизировать их рост. **Заключение.** Получена комплексная органоминеральная добавка на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния. Установлено, что введение индивидуальной добавки в процессе синтеза частиц диоксида кремния способствует повышению агрегативной устойчивости дисперсной системы комплексной добавки, обеспечивает снижение тенденции частиц к укрупнению и седиментации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дисперсные системы, наномодифицирование, агрегативная устойчивость, модификатор, наночастицы, диоксид кремния, SiO<sub>2</sub>, дифференциальное распределение, золь – гель метод, коагуляция.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Старченко С.А., Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 447–462. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-447-462>. – EDN: LWATIE.



## ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная индустрия требует инновационных решений для улучшения характеристик материалов, используемых в различных строительных проектах. Одним из таких решений является использование комплексных органо-минеральных добавок с наночастицами, таких как диоксид кремния, которые способны улучшить физико-механические свойства минеральных смесей. Наночастицы играют ключевую роль в усилении коагуляционной структуры, снижении трещинообразования и повышении долговечности бетона. Важным аспектом разработки таких добавок является их способность оптимизировать процессы структурообразования и реологические свойства цементных систем, что актуально для аддитивных технологий и 3D-печати.

Полифункциональные (комплексные) добавки в цементных смесях играют ключевую роль в строительных аддитивных технологиях благодаря своей способности улучшать реологические и механические свойства смеси. Эти добавки обладают множеством функций, позволяющих регулировать текучесть, вязкость и пластичность цементных смесей, что существенно упрощает процессы смешивания и экструзии [1]. Ввиду этого, добавки способствуют равномерному распределению компонентов бетона за счет пептизирующей способности.

Исходя из исследований, проведенных автором [2], известно, что наночастицы диоксида кремния увеличивают скорость гидратации цемента и способствуют направленному формированию консолидированных надмолекулярных структур силиката кальция, которые структурируют цементную матрицу, тем самым повышают ее прочность.

Согласно работам авторов [3–7], добавление наночастиц диоксида кремния в минеральные суспензии способствует устранению дефектов структуры бетона ввиду заполнения микропор и микротрещин частицами диоксида кремния. Согласно этому, повышаются прочностные характеристики бетона, снижается усадка и водопоглощение, а также улучшается морозостойкость [8–9].

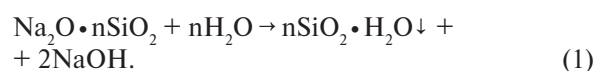
Использование частиц диоксида кремния оправдано тем, что они могут служить центрами кристаллизации в гидросиликатных фазах цементного камня и интегрироваться в его структуру благодаря схожей кристаллохимической природе с гидросиликатами кальция [4, 9–10].

Известно [4], что производство полифункциональных (комплексных) добавок с использованием наночастиц делится на несколько процессов: синтез пластифицирующей добавки, синтез наночастиц, смешивание активных компонентов, созревание готовой добавки.

В настоящее время для получения наноразмерных частиц используют два основных метода — дисперсионный и конденсационный [11–12]. В первом методе основным процессом является измельчение грубодисперсных материалов с последующей диспергацией полученных частиц. Во втором методе (золь — гель метод) основным процессом получения частиц является фазовое или химическое превращение.

Для получения наноразмерных частиц диоксида кремния золь — гель методом используют два направления: синтез из органических веществ и минеральных веществ соответственно. Основной протекающий процесс — это гидролиз применяемых веществ.

В качестве реактива для синтеза частиц диоксида кремния используют натриевое жидкое стекло состава  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ , анионная часть которого состоит из кремниевых кислот различной полимерности [13–14]. Гидролиз водного раствора силиката натрия протекает по схеме [15–16]:



Взаимодействие раствора силиката натрия с растворами минеральных кислот можно представлять по схеме [13–14]:



Однако точно описать схему химической реакции трудно, так как силикат натрия в ходе взаимодействия имеет широкий спектр полимерных превращений [13–14].

Данный метод позволяет синтезировать частицы диоксида кремния размером порядка 5–50 нм, но при оптимизации процесса синтеза и использовании специальных реагентов можно достичь и меньших размеров [4, 17, 18]. Однако стоит отметить, что точный размер частиц и их распределение могут варьироваться от условий эксперимента и используемых методов анализа.

Согласно работам авторов [4, 9, 19–20], в лабораторных условиях можно получать частицы диоксида кремния размерами от 2 нм. Для синтеза наноразмерных частиц диоксида кремния авторы [9, 19–20] применяли титрование 0,1 М раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  0,1 М раствором  $\text{HCl}$  с дальнейшим созреванием получаемых частиц.

Целью данного исследования являлась разработка способа получения частиц нанодиапазона диоксида кремния в водной среде, изучение их агрегативной устойчивости для дальнейшего получения полифункциональной (комплексной) органо-минеральной добавки.



## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве органической составляющей добавки применяли модификатор на основе флороглюцинфурфурильных олигомеров, синтезированный авторами, методом поликонденсации (далее индивидуальная добавка) [21].

Для получения частиц диоксида кремния нанодиапазона (минеральной составляющей добавки) использовали натриевое жидкое стекло.

Для проверки стабильности растворов силиката натрия готовили водные растворы силиката натрия с разной концентрацией: 1, 4, 7 и 10% соответственно. Определяли размеры частиц в свежеприготовленных растворах силиката натрия методом лазерной дифракции света на приборе Malvern Mastersizer 3000. В качестве дисперсионной среды использовали очищенную воду, а измерение размера частиц проводили в диспергаторе прибора при скорости циркулирования системы 2000 об/мин. Статистическая обработка выполнялась программным обеспечением прибора с использованием теории МИ. Средний размер частиц определяли как медиану интегрального распределения, а именно  $D(x) 50$ .

В качестве системы для роста частиц диоксида кремния применяли модифицированный раствор силиката натрия. В колбу объемом 500 мл помещали 11,8 г 42,5% натриевого жидкого стекла и растворяли в 493 мл воды. Колбу с раствором нагревали при температуре 90°C в течение двух часов. Раствор охлаждали и отстаивали при температуре 25°C в течение 1 суток. После этого раствор декантировали, фильтровали под разряженным воздухом через нейлоновый мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. В качестве раствора нейтрализатора использовали раствор соляной кислоты. Так как соляная кислота является прекурсором, то раствор готовили из фиксаналов.

Для изучения действия индивидуальной добавки в составе комплексной в качестве антикоагулянта дисперсной фазы дополнительно проводили на исследование Аэросил 200 — коллоидный диоксид кремния по ГОСТ 14922-77 с удельной поверхностью, равной 2000 м<sup>2</sup>/кг [22]. Минералогический состав, вес. %: SiO<sub>2</sub> — 99,8. К навеске аэросила массой 100 мг приливали 20 мл очищенной воды, тщательно суспензировали на перемешивающем устройстве вихревого типа и проводили измерение распределения размера частиц методом лазерной дифракции света. После этого в раствор вносили аликвоту индивидуальной добавки, чтобы концентрация составляла 0,2%, и медленно перемешивали раствор, чтобы исключить механическое воздействие на агломераты. После чего проводили измерение распределения частиц. После измерения образец

с индивидуальной добавкой обрабатывали ультразвуком в ультразвуковой ванне Elmasonic S150 при частоте 37 кГц в течение одной минуты.

Для изучения кинетики размеров частиц диоксида кремния в присутствии индивидуальной добавки применяли следующую концепцию: готовили модифицированный раствор силиката натрия с индивидуальной добавкой различной концентрации: 0,2, 0,5 и 1,0%, после чего проводили синтез частиц диоксида кремния. К приготовленным модифицированным растворам с разной концентрацией индивидуальной добавки приливали 50 мл 0,1 М раствор соляной кислоты со скоростью 5 мл/мин, при перемешивании растворов со скоростью 500 об/мин. Полученные образцы термостатировали при температуре 25°C для созревания частиц в течение 7 суток.

Распределение частиц по размеру и агрегативную устойчивость определяли двумя разными методами:

1) Методом лазерной дифракции света на приборе Mastersizer 3000, Malvern. В качестве дисперсионной среды применяли воду, а измерение проводили при скорости 2000 об/мин. Статистическая обработка выполнялась программным обеспечением прибора с использованием теории МИ;

2) Методом динамического рассеивания света на приборе Microtrac S3500. В качестве дисперсионной среды применяли воду. Статистическая обработка выполнялась программным обеспечением «Microtrac FLEX».

Микроскопический анализ комплексной добавки проводили на электронном сканирующем микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU, который имеет катод Шоттки с полевой эмиссией, используемый для получения изображений высокого разрешения с высокой яркостью, контрастностью и низким уровнем шумов.

Контроль химического строения и состава синтезированной добавки проводили методами УФ- и ИК- спектрофотометрией на приборах Specord 200 plus производителя Analytik Jena и Alpha, производителя Bruker Optics.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе приготовления растворов силиката натрия с различными концентрациями было замечено, что растворы демонстрировали различную степень опалесценции (рис. 1). При этом с повышением концентрации силиката натрия степень опалесценции возрастала, что свидетельствует о росте агрегатов частиц диоксида кремния. Для подтверждения роста частиц диоксида кремния в результате гидролиза растворимой соли изучали кинетику формирования агрегатов частиц диоксида кремния в растворах с разной концентрацией силиката натрия мето-



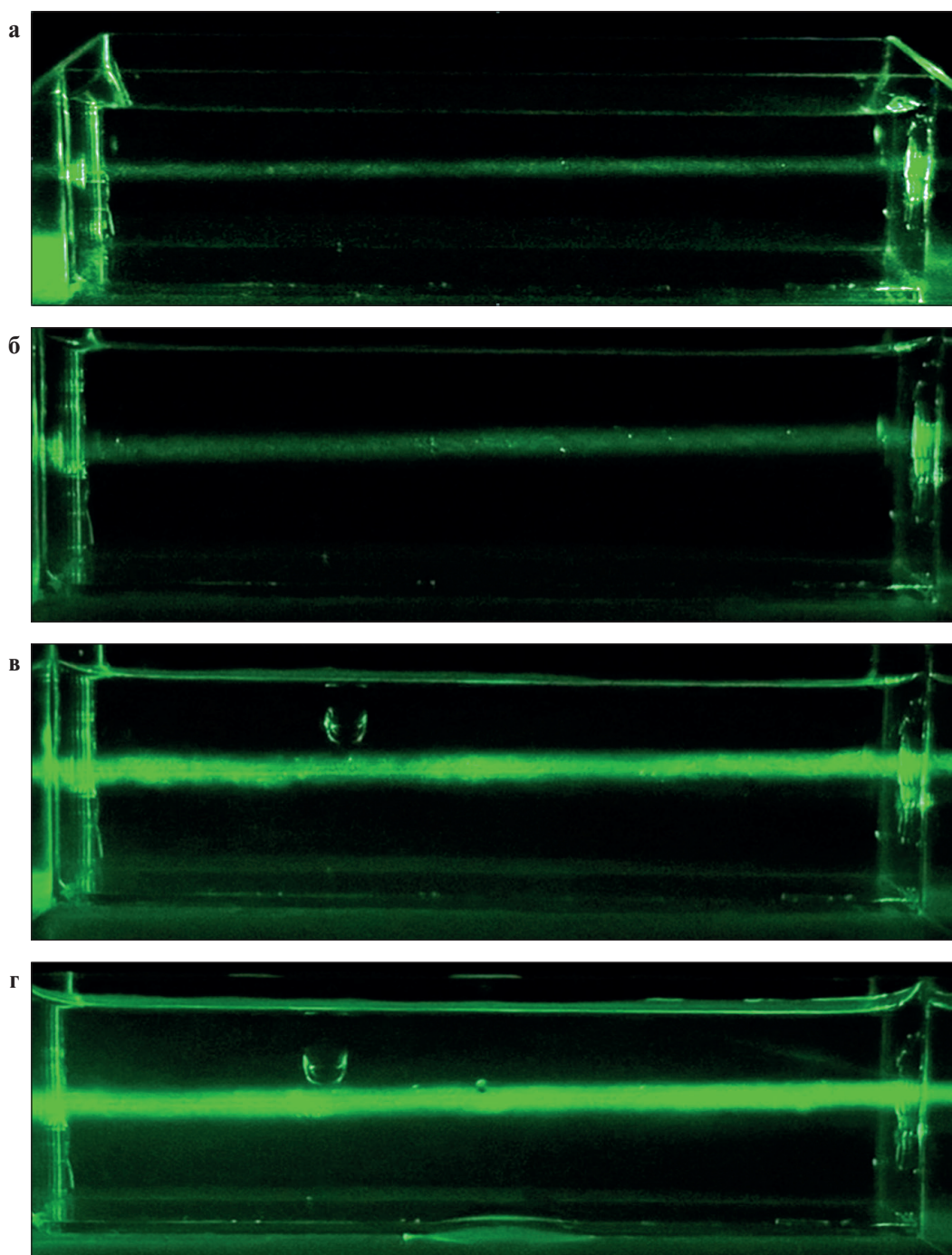


Рис. 1. Изображение водных растворов силиката натрия с разной степенью опалесценции: а) 1% раствор; б) 4% раствор; в) 7% раствор; г) 10% раствор

дом лазерной дифракции света на приборе Malvern Mastersizer 3000.

Согласно полученным данным (рис. 2) выявлено, что в процессе гидролиза раствора силиката натрия происходит коагуляция частиц диоксида кремния с образованием крупных агрегатов. С увеличением концентрации силиката натрия значительно усиливается процесс гидролиза, что способствует увеличе-

нию скорости коагуляции частиц. Установлено, что растворы силиката натрия подвержены сильному гидролизу, в результате которого образуются крупные агрегаты диоксида кремния, в виду чего система не обладает агрегативной устойчивостью.

Для подтверждения агрегативной устойчивости растворы силиката натрия разной концентрацией нагревали при температуре  $90^{\circ}\text{C}$  в течение двух часов,



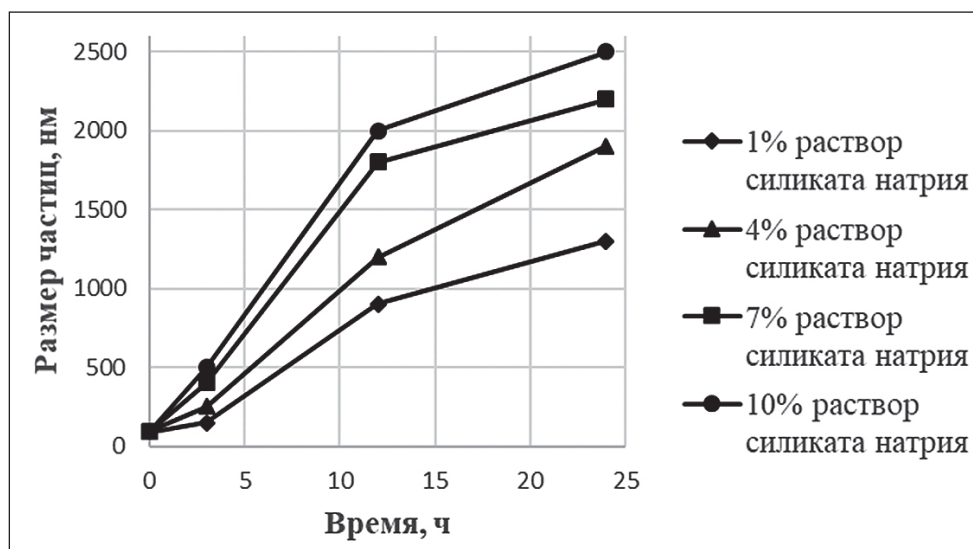


Рис. 2. Кинетика формирования агрегатов частиц диоксида кремния

после чего растворы охлаждали и отстаивали при температуре 25°C в течение 1 суток. По прошествии времени было обнаружено, что все растворы были прозрачные (без опалесценции) и с белым, аморфным осадком на дне. Ввиду этого установлено, что температура нарушала термодинамическую устойчивость системы, и за счет этого произошло образование агрегатов со значительной массой, что привело к потере седиментационной устойчивости, и, как следствие, произошло разделение системы на две фазы: дисперсионную среду и осадок.

Исходя из полученных данных, было установлено, что для получения частиц нанодиапазона необходимо модифицировать раствор силиката натрия для предотвращения коагуляции частиц диоксида, чтобы исключить образование крупных агрегатов.

Для замедления роста агрегатов проводили исследование влияния флороглюцинфурфурольного модификатора (индивидуальной добавки) на частицы (агрегаты) диоксида кремния с целью повышения агрегативной устойчивости системы с частицами диоксида кремния.

Для проведения данного исследования готовили 1% водный раствор силиката натрия и измеряли распределение размера частиц методом лазерной дифракции света. После этого в раствор вносили аликвоту индивидуальной добавки, чтобы концентрация составляла 0,2% и медленно перемешивали раствор для исключения механического воздействия на агрегаты. После этого измеряли распределение размера частиц. Кривые объемного распределения размера частиц диоксида кремния до и после внесения индивидуальной добавки представлены на рис. 3.

Результаты показали, что в исходном образце средний размер частиц составил около 102 нм, а после добавления индивидуальной добавки часть частиц уменьшилась до 71 нм.

Таким образом, добавление индивидуальной добавки (концентрация добавки в растворе составляла 0,2%) вызывало пептизацию агрегатов, тем самым разбивая агрегаты на более маленькие, что и приводило к образованию бимодального распределения частиц (рис. 3 б).

Для подтверждения действия индивидуальной добавки в качестве антикоагулянта исследование проводили на аморфном синтетическом кремнеземе Аэросил 200 с удельной поверхностью около 200 м<sup>2</sup>/г.

Результаты исследования показали, что в исходной суспензии Аэросила большинство частиц имело размер около 430 нм. После добавления индивидуальной добавки размеры частиц уменьшились до 117 нм. После ультразвуковой обработки суспензии Аэросила с добавкой размер частиц составил около 43 нм, а распределение изменилось с бимодального на мономодальное (рис. 4б и рис. 4в), что свидетельствует о полном разрушении крупных агрегатов.

Исходя из проделанной работы, установлено, что индивидуальная добавка способствует пептизации частиц. Действие ультразвука позволяет проводить полную диспергацию частиц с образованием наноразмерных частиц.

В дальнейшем для получения наночастиц диоксида кремния применяли метод кислотного титрования. В качестве системы для роста частиц использовали модифицированный раствор силиката натрия, а в качестве раствора титранта применяли соляную кислоту.

Синтез наночастиц диоксида кремния методом кислотного титрования проводили по плану исследования, представленного в табл. 1.

Раствор титранта подавали с заданной скоростью при помощи перистальтического насоса. Синтез наночастиц осуществляли при комнатной температу-



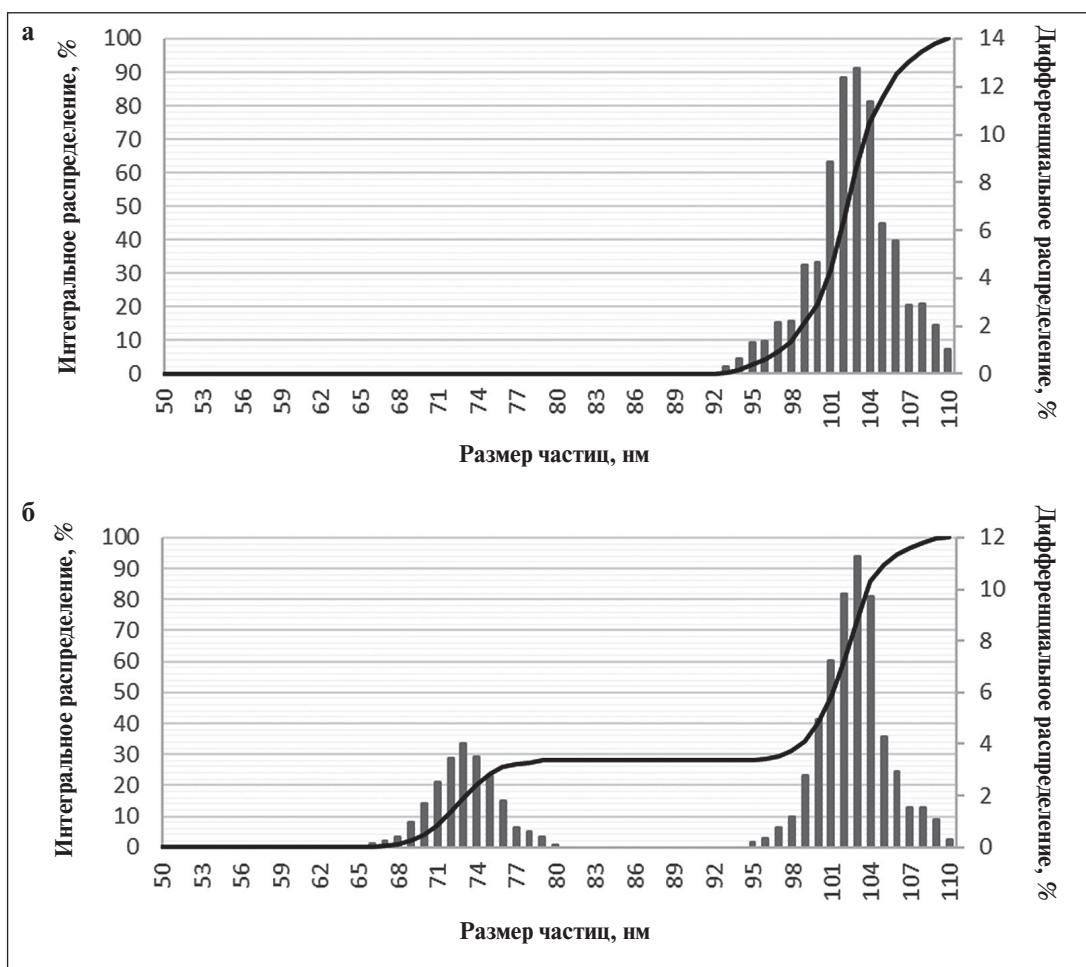


Рис. 3. Кривые объёмного распределения размеров частиц диоксида кремния: а) до внесения индивидуальной добавки; б) после внесения индивидуальной добавки



Рис. 4. Кривые объёмного распределения агрегатов Аэросила: а) до внесения индивидуальной добавки; б) после внесения индивидуальной добавки; в) после внесения индивидуальной добавки и обработки ультразвуком



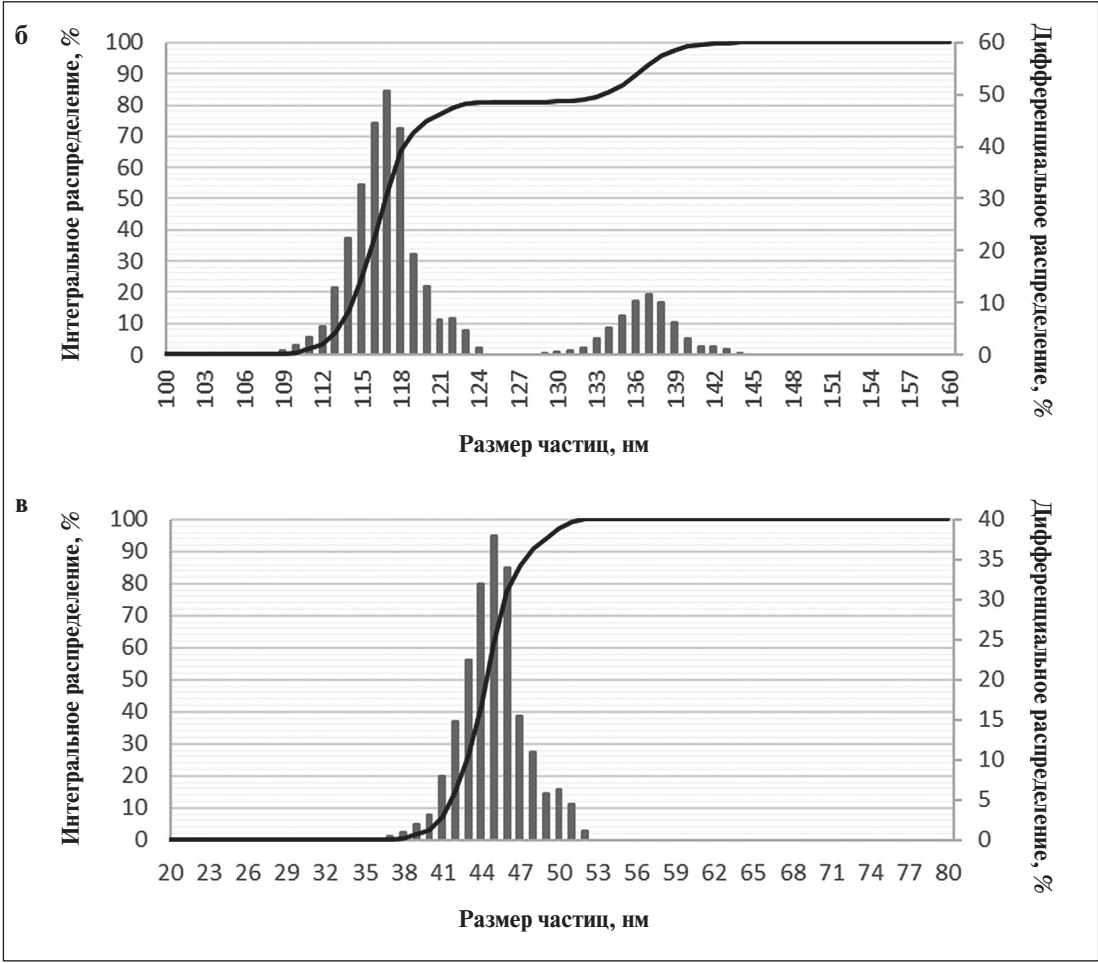


Рис. 4. Окончание

Таблица 1

План исследования синтеза частиц нанодиапазона диоксида кремния

Параметр	Название образца		
	Испытуемый образец № 1	Испытуемый образец № 2	Испытуемый образец № 3
Скорость перемешивания, об/мин	500		
Скорость добавления HCl, мл/мин	5		
Объем модифицированного раствора Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , мл	100		
Температура синтеза, °C	25		
Концентрация модифицированного раствора Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , моль/л	0,1		
Объем HCl, мл	100	50	25
Концентрация HCl, моль/л	0,1	0,1	0,2
Период измерения размеров частиц	Свежеприготовленные, через 1 сут, 2 сут, 3 сут, 4 сут, 5 сут, 6 сут, 7 сут		



ре. После синтеза полученные растворы хранили до 7 суток.

Согласно полученным данным, видно, что через 1 сутки начался рост золь частиц диоксида крем-

ния. В испытуемом образце № 1, где объемы растворов были смешаны в эквимольном соотношении (1:1 об/об), основная часть частиц имела размер 14 нм (рис. 5 а), в испытуемом образце № 2, где

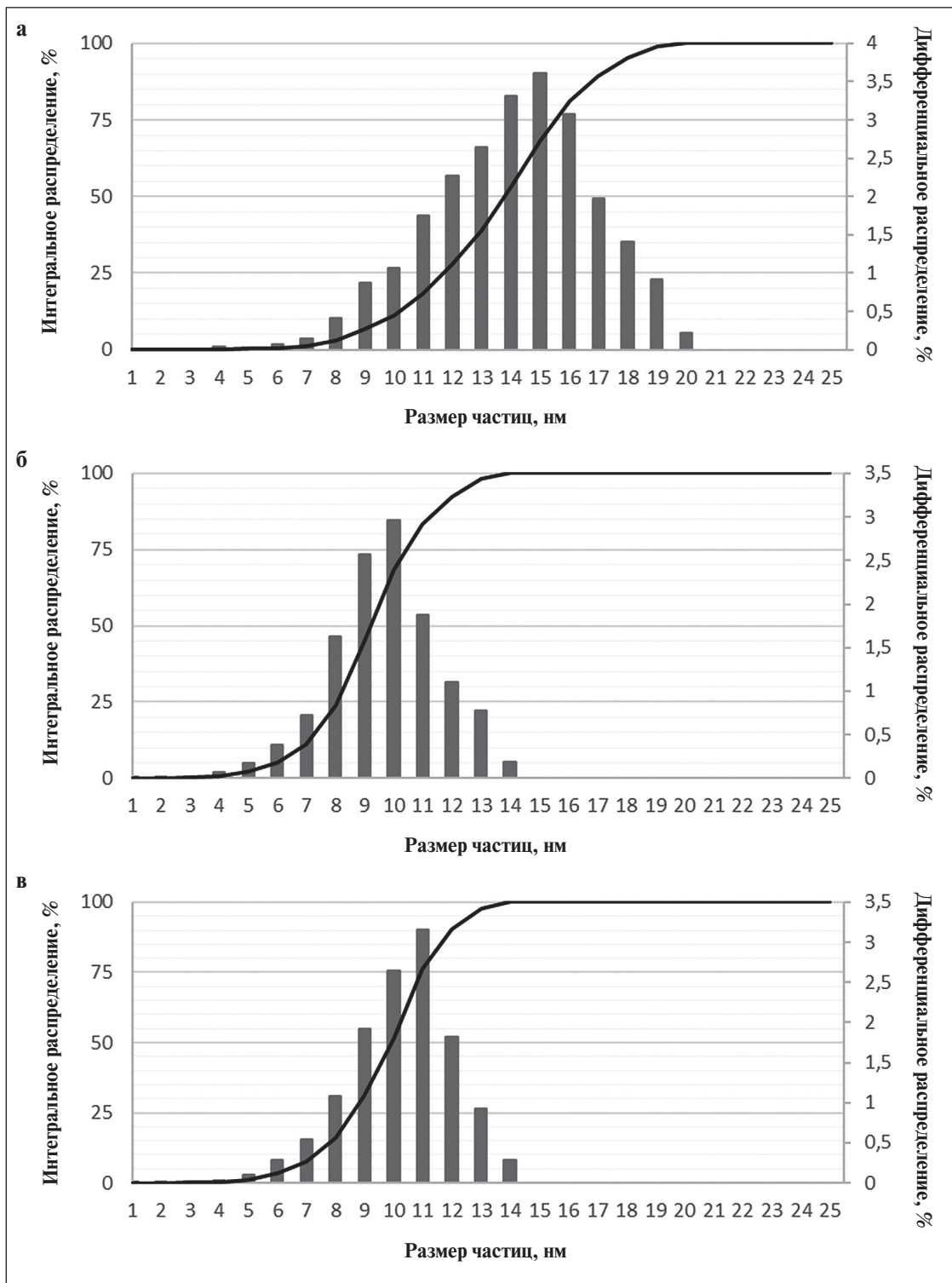


Рис. 5. Кривые объемного распределения частиц диоксида кремния через 1 сутки: а) испытуемый образец № 1; б) испытуемый образец № 2; в) испытуемый образец № 3



объемы растворов были смешаны в соотношении 2:1 об/об (силикат : кислота), часть частиц имела размер 9 нм (рис. 5 б), а в испытуемом образце № 3, где концентрация кислоты была в 2 раза больше, часть частиц имела размер 10 нм (рис. 5 в). Следует отметить, что в трех образцах сразу после синтеза частиц обнаружено не было.

Исходя из полученной зависимости размера золь частиц диоксида кремния от периода созревания (рис. 6), видно, что с увеличением периода созревания частицы увеличиваются в размерах. В испытуемом образце № 1 основная часть частиц через 1 сутки имела размер 14 нм, а через 7 суток 83 нм. В испытуемом образце № 2 основная часть частиц через 1 сутки имела размер 9 нм, а через 7 суток 68 нм. В испытуемом образце № 3 основная часть частиц через 1 сутки имела

размер 10 нм, а через 7 суток 72 нм. Во всех испытуемых образцах после 7 суток созревания наблюдалась легкая опалесценция, что говорит о продолжении роста частиц (увеличении размера частиц).

Результаты изучения кинетики роста размеров частиц диоксида кремния, полученных методом кислотного титрования в присутствии индивидуальной добавки с разной концентрацией, представлены на рис. 7.

Как видно из зависимости (рис. 7), индивидуальная добавка с концентрацией от 0,2 до 1,0% стабилизирует рост частиц (замедляется процесс коагуляции). С периодом созревания размер частиц увеличивался в среднем в 2,5 раза, что является незначительным значением для роста наночастиц. На рис. 8 представлено дифференциальное распре-

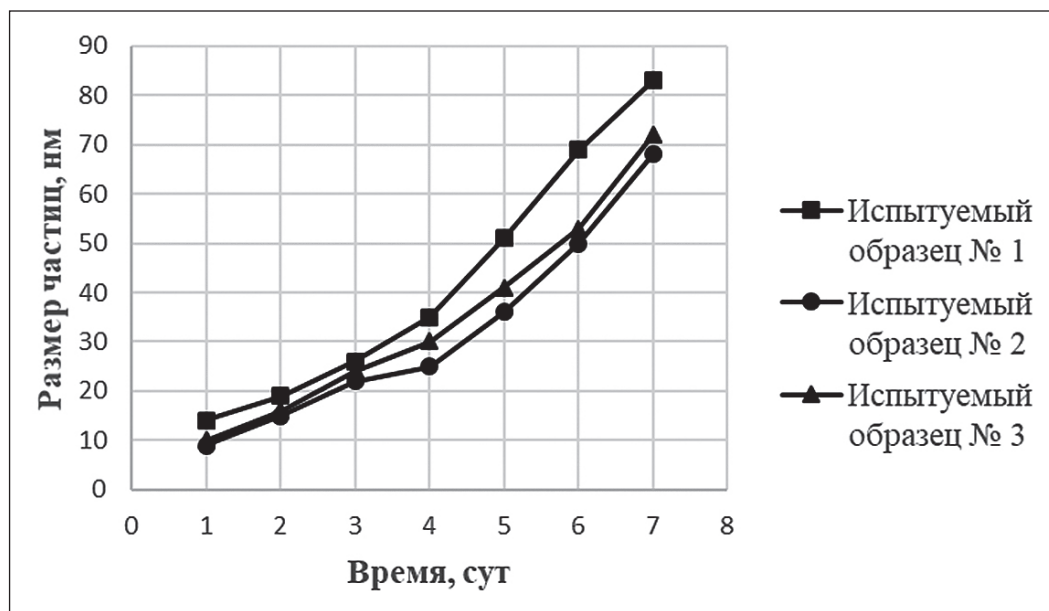


Рис. 6. График зависимости размера золь частиц диоксида кремния от периода созревания

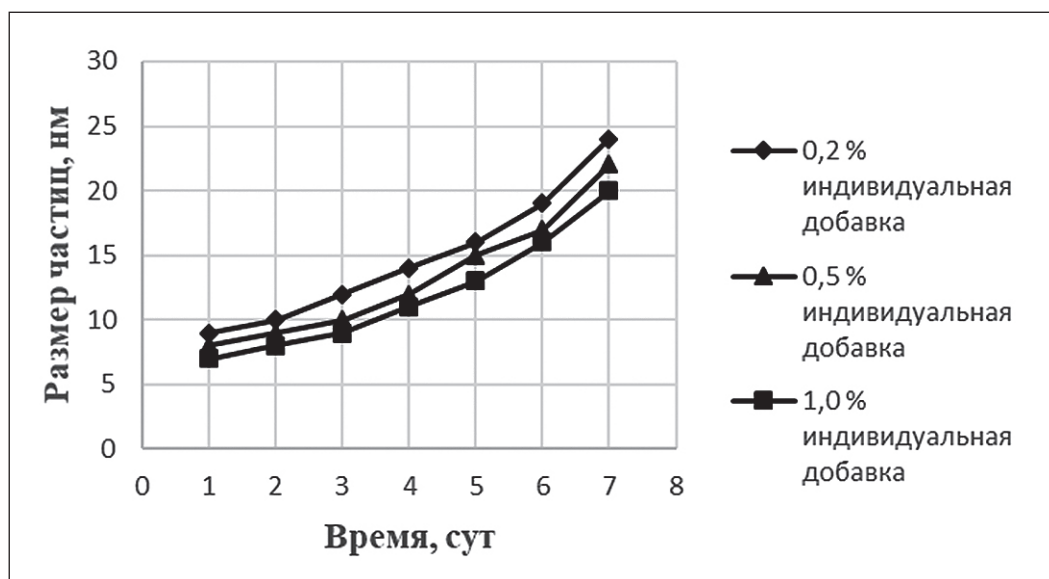


Рис. 7. Зависимость распределения размеров частиц диоксида кремния от периода созревания и концентрации индивидуальной добавки



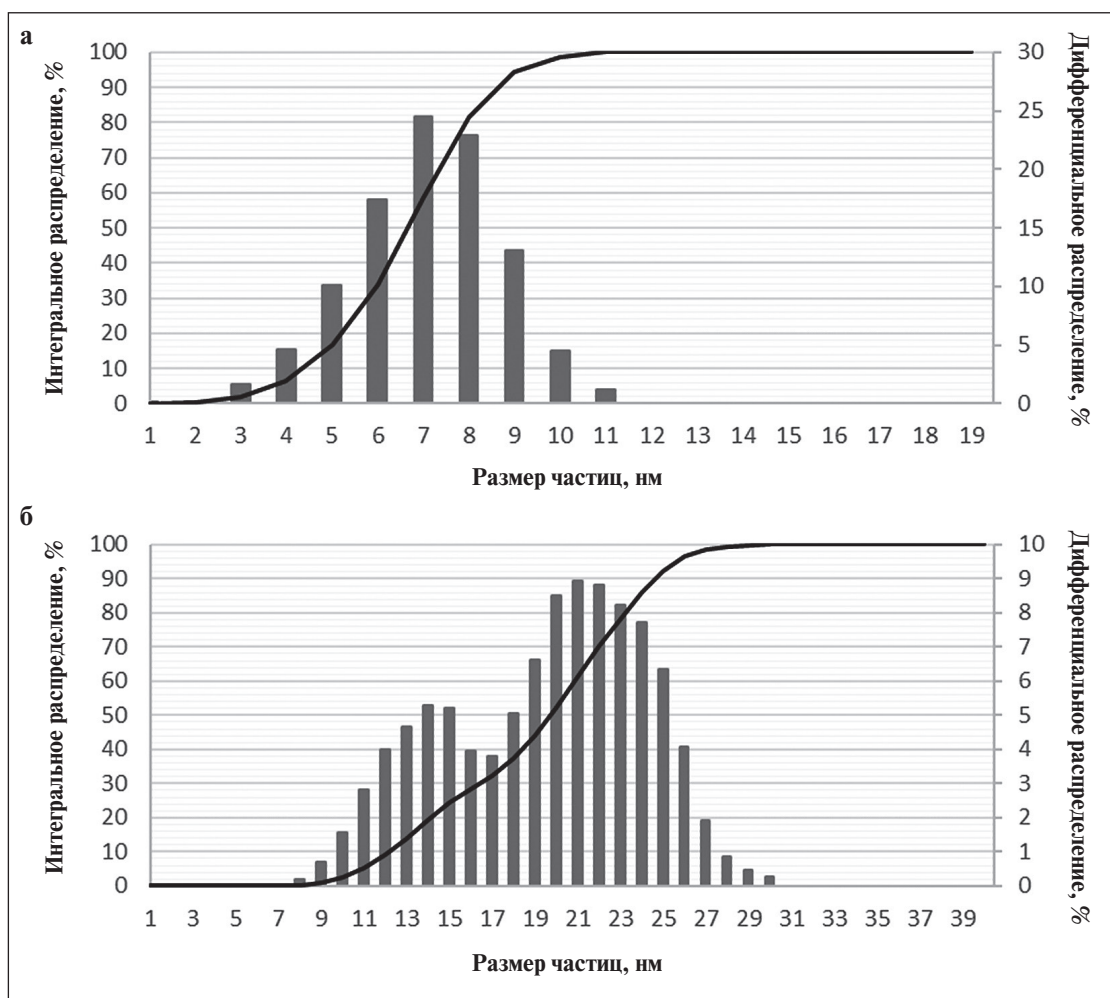


Рис. 8. Изменение дифференциального распределения частиц диоксида кремния с индивидуальной добавкой (1%) во времени: а) через 1 сутки; б) через 7 суток

деление частиц диоксида кремния с введенной индивидуальной добавкой с концентрацией 1% через сутки созревания и через 7 суток.

Исходя из полученных данных распределения частиц, через одни сутки созревания основная часть частиц имеет размер 7 нм, это подтверждается мономодальным узким распределением, а через 7 суток созревания размер частиц увеличился до 20 нм, при этом распределение частиц имело бимодальный вид, что указывает на образование агрегатов.

Исследования показали, что введение индивидуальной добавки на стадии синтеза частиц позволяет стабилизировать рост частиц, так как исходя из ранее проведенных исследований [25–27] можно предположить протекание процесса адсорбции молекул индивидуальной добавки на поверхности исследуемых частиц, в результате чего будет наблюдаться снижение поверхностного натяжения на границе твердое тело – дисперсионная среда, что приводит к снижению частиц к агрегации.

С учетом представленных результатов, был разработан способ получения комплексной органоминеральной добавки, основные этапы которого описаны ниже:

Перед проведением синтеза индивидуальной добавки к раствору флороглюцина добавляли модифицированный раствор силиката натрия в количестве 50% от массы флороглюцина и проводили синтез индивидуальной добавки при оптимальных условиях.

Для синтеза наночастиц диоксида кремния проводили смещение химического равновесия в растворе путем внесения раствора соляной кислоты с оптимальной скоростью. Созревание наночастиц диоксида кремния проводили при температуре 25°C в течение 3 суток.

Контроль состава полученной комплексной органоминеральной добавки проводили методом УФ- и ИК- спектроскопией сразу после синтеза. ИК-спектр и УФ-спектр синтезированной комплексной органоминеральной добавки представлены на рис. 9.



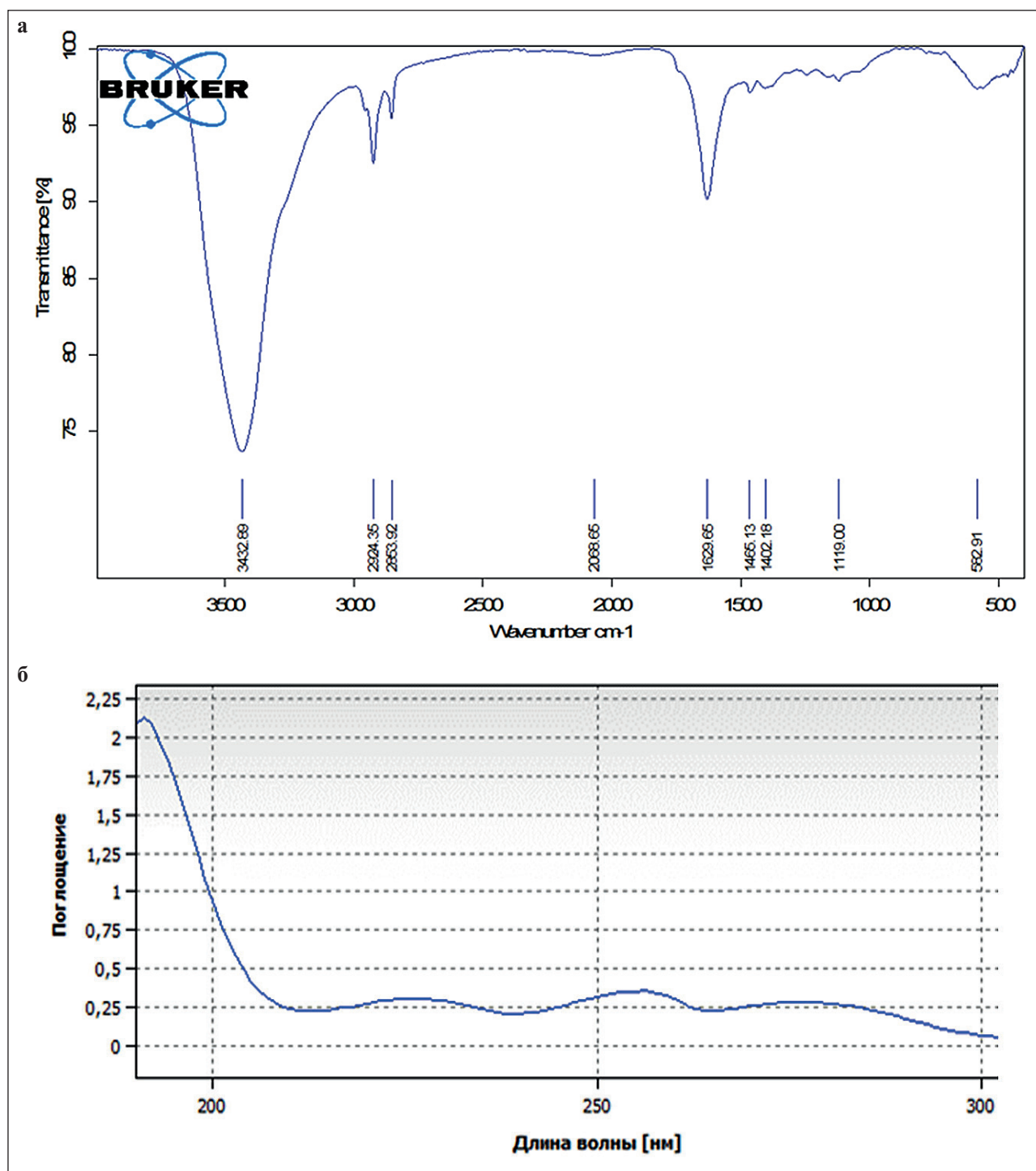


Рис. 9. Спектры синтезированной комплексной органоминеральной добавки: а) ИК-спектр; б) УФ-спектр

Исходя из результатов УФ- и ИК-спектроскопии, следует, что добавление силиката натрия на стадии синтеза не влияет на химическую структуру индивидуальной добавки.

Размер частиц диоксида кремния в комплексной органоминеральной добавке через 3 суток созревания частиц составил в среднем около 7 нм. Кривая

объемного распределения частиц диоксида кремния в комплексной органоминеральной добавке через 3 суток созревания представлена на рис. 10.

Для визуализации частиц диоксида кремния в синтезированной комплексной органоминеральной добавке добавку наносили на токопроводящую пластинку в тонком слое и сушили при температуре



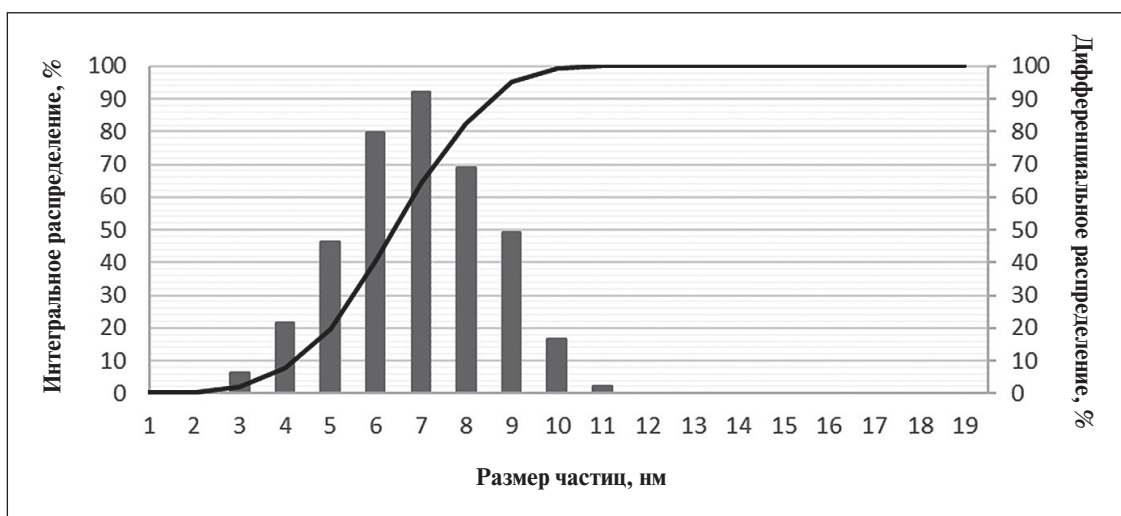


Рис. 10. Кривая объемного распределения частиц диоксида кремния в комплексной органоминеральной добавке через 3 суток созревания

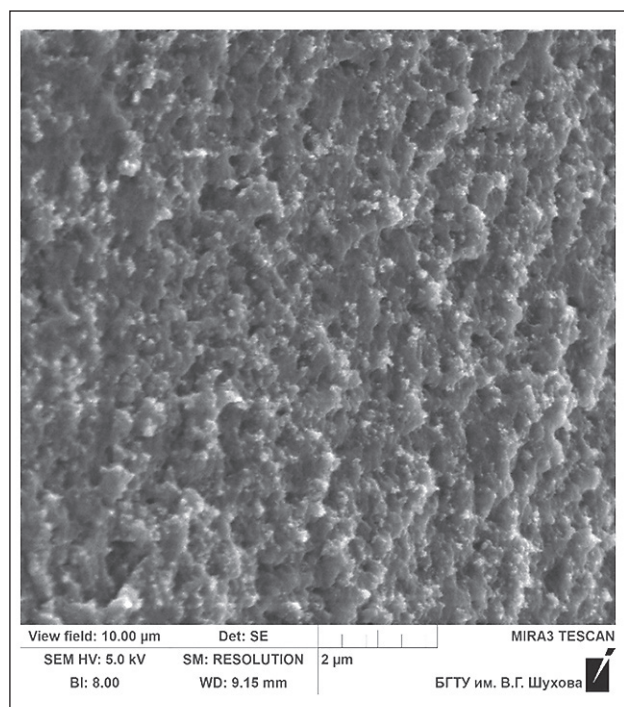


Рис. 11. Микроструктура комплексной органоминеральной добавки

105°C, после чего делали микрофотографии на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (рис. 11).

На микрофотографии отчетливо видно большое количество белых вкраплений, которые состоят из частиц диоксида кремния, что подтверждается по локальному элементному спектру, сделанному на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (рис. 12).

Установлено, что в составе комплексной органоминеральной добавки присутствуют наноразмерные частицы диоксида кремния. При этом индивидуальная добавка выполняет две ключевые функции: стабилизирует процесс роста частиц диоксида кремния и способствует равномерному распределению частиц во всем объеме комплексной добавки.

В результате проделанного исследования был получен патент РФ на изобретение № 2806395 «Комплексная добавка для бетонов строительной 3D-печати» [28].

Для сушки комплексной органоминеральной добавки был опробован метод сушки в вакууме при температуре 40°C. Микрофотографии комплексной органоминеральной добавки, высушенной в вакууме при температуре 40°C, представлены на рис. 13.

Как видно, в слое комплексной добавки наблюдаются крупные частицы диоксида кремния, это обусловлено тем, что в процессе сушки медленно испарялась влага, тем самым увеличивалась концентрация, и, как следствие, происходил активный рост частиц (время сушки 2 часа).

В дальнейшем исследовании проводили высушивание добавки методом распыления раствора комплексной добавки при температуре 60°C. Микрофотография высушенной методом распыления комплексной органоминеральной добавки при температуре 60°C представлены на рис. 14.

Видно, что частицы не укрупнились и имеют малый размер. Следует отметить, что данный способ технически сложный для реализации в лабораторных условиях, так как образующуюся пыль из частиц высушенной добавки сложно захватить и зафиксировать.

Высушивание комплексной органоминеральной добавки в вакууме оказалось неэффективным вслед-



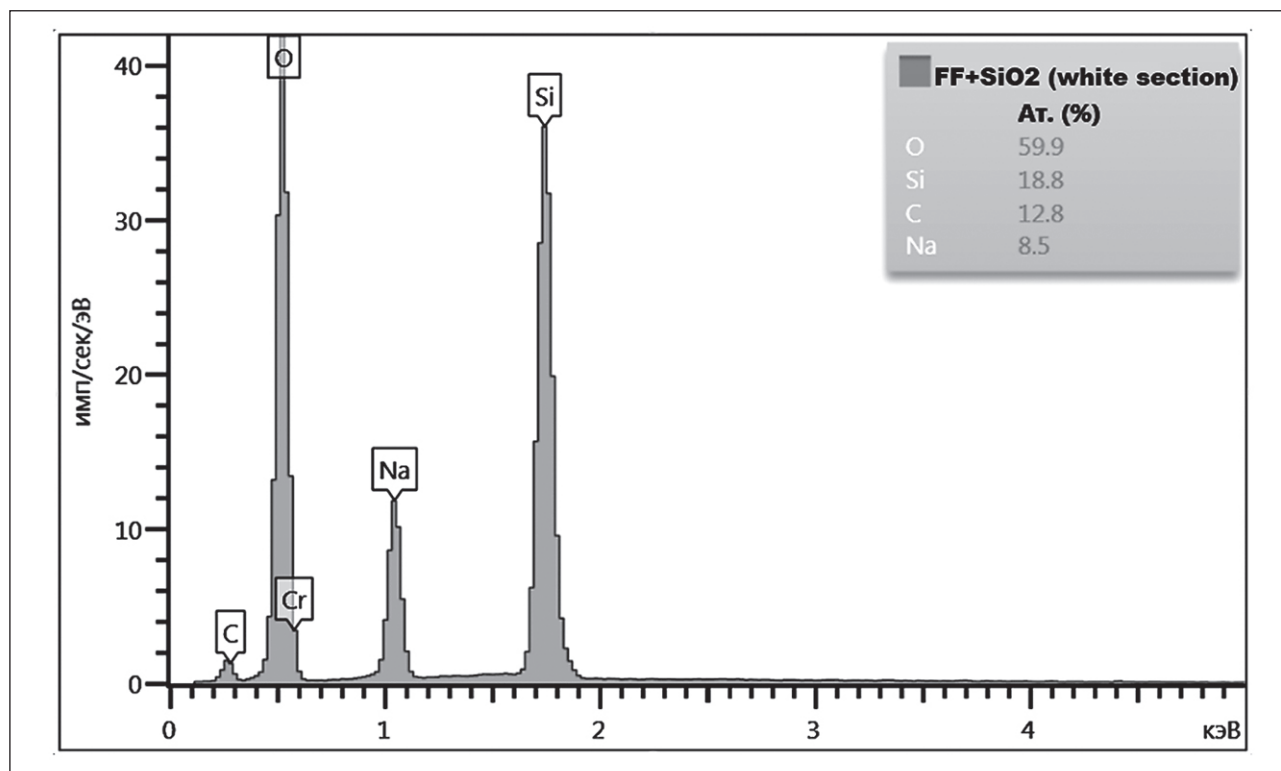


Рис. 12. Локальный элементный спектр комплексной индивидуально добавки

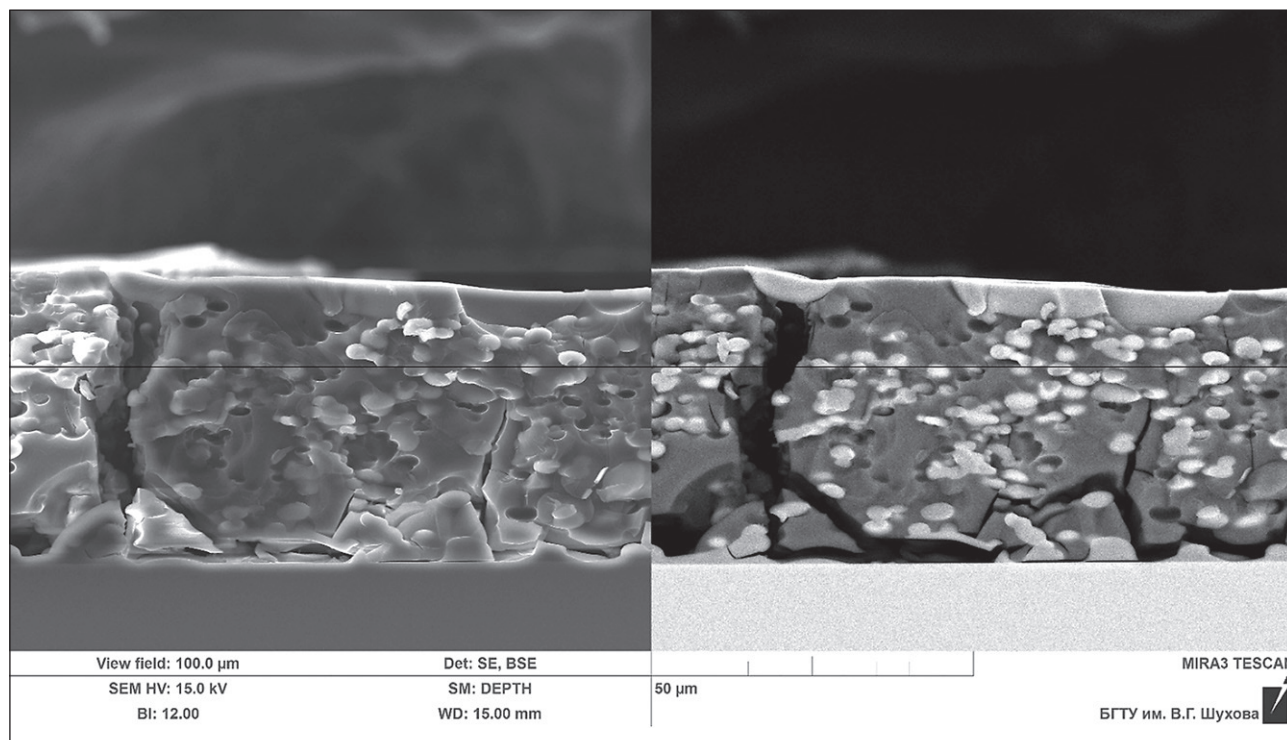


Рис. 13. Микрофотографии высушенной в вакууме комплексной органоминеральной добавки при температуре 40°C



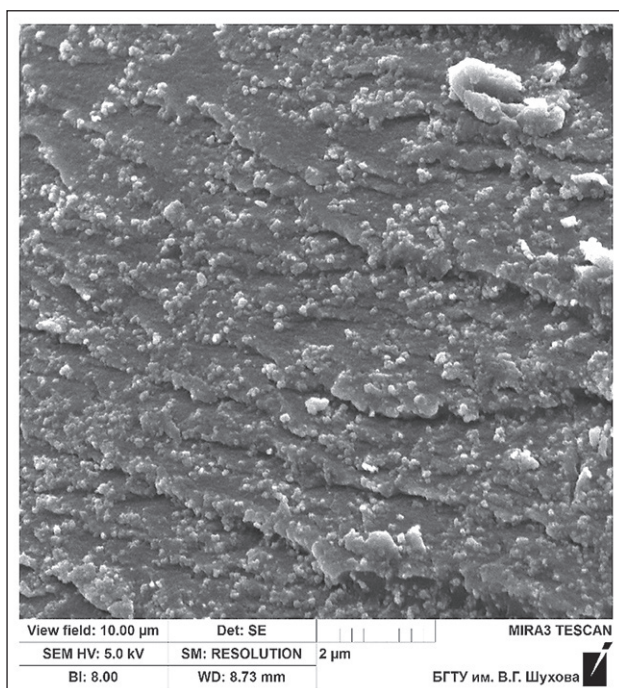


Рис. 14. Микроструктура комплексной органоми-  
неральной добавки, высушенной методом распыления  
при температуре 60°C

ствие значительного укрупнения частиц диоксида кремния. При сушке комплексной органоми-  
неральной добавки методом распыления значительного  
роста частиц не происходило, пластифицирующая  
способность и активность добавки не изменилась.  
Ввиду этого, эффективным способом можно считать  
сушку способом распылением при температуре 60°C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что методом гидролиза силиката натрия возможно получать наноразмерные частицы диоксида кремния. С увеличением концентрации силиката натрия значительно увеличивается количество частиц диоксида кремния, что приводит к быстрой коагуляции частиц с образованием крупных агрегатов. Увеличение температуры вызывает быстрый рост агрегатов, в результате чего они выпадают в осадок.

Доказано, что методом кислотного титрования можно получать частицы диоксида кремния размером менее 10 нм. В период созревания частиц с 1 до 7 суток происходит увеличение размеров частиц примерно в 7 раз. Оптимальным соотношением для синтеза частиц следует считать соотношение растворов реактивов 2:1 об/об (силиката натрия к соляной кислоте).

Получена комплексная органоми-  
неральная добавка на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния.

Установлено, что введение индивидуальной добавки на стадии синтеза наночастиц диоксида кремния позволяет стабилизировать рост частиц, что способствует уменьшению тенденции частиц к агрегации.

Определен эффективный процесс сушки комплексной органоми-  
неральной добавки методом распыления при температуре 60°C, благодаря которому не происходит значительного роста частиц диоксида кремния и не изменяется пластифицирующая способность и активность добавки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chindaprasirt R. Effect of Cenospheres on the Performance of Various Cement Composites / R. Chindaprasirt. Journal of Materials in Civil Engineering. 2009; 21(9):480–487.
2. Hewlett P. Lea's Chemistry of Cement and Concrete / Peter Hewlett. Ed Butterworth-Heinemann. UK: Elsevier; 2003.
3. F. Sanchez, K.Sobolev. Nanotechnology in concrete. A review. Construction and Building Materials. 2010; 24: 2060–2071.
4. Артамонова О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография // Воронежский ГАСУ. Воронеж, 2016. 100 с.
5. Каприелов С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон. 1992. № 7. С. 4–7.
6. Королёв А.С. Мелкозернистые бетоны с нанодобавками синтетического цеолита / А.С. Королёв, Э.Ш. Хакимова // Бетон и железобетон. 2008. № 6. С. 13–15.
7. Коротких Д.Н. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М. Чернышев // Нанотехнологии в строительстве. 2009. № 2. С. 42–49.



8. Комохов П.Г. Высокопрочный бетон на основе элементов нанотехнологии по методу золь-гель / П.Г. Комохов, Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, А.М. Сычева // Материалы IX академических чтений РААСН, Пенза: Изд-во ПГУАС, 2006. Часть II. С. 8–10.
9. Артамонова О.В. Технология наномодифицирования структуры неорганических систем твердения строительных композитов: диссертация ... доктора технических наук: 05.23.05 / Артамонова Ольга Владимировна. Воронеж: Иван. гос. политехн. ун-т, 2018. 457 с.
10. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
11. Помогайло А.Д. Наночастицы металлов в полимерах / А.Д. Помогайло, А.С. Розенберг, И.Е. Уфлянд. М.: Химия, 2000. 672 с.
12. Королев Е.В. Основные принципы практической нанотехнологии в строительном материаловедении / Е.В. Королев // Нанотехнологии в строительстве. 2009. № 1. С. 66–79.
13. Лукаш Е.В., Шалухо Н.М., Качурина В.С. Получение и исследование свойств безводного метасиликата натрия // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 56–63.
14. Жидкое стекло. Получение, состав, структура и свойства: метод. указания к выполнению лабораторной работы / Н.В. Шальнева, О.В. Агейкина. Тюменский индустриальный университет. 1-е изд. Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ. 2016. 36 с.
15. Шабанова Н.А. Химия и технология нанодисперсных оксидов: учебное пособие / Н.А. Шабанова, В.В. Попов, П.Д. Саркисов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 309 с.
16. Jeffrey Brinker, C. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing / C. Jeffrey Brinker, W. Scherer. George: Academic Press; 2013.
17. Chaudhuri, R.G. Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications / R.G. Chaudhuri, S. Paria. Chemical reviews. – 2012. – Т. 4, № 112. – С. 2373–2433.
18. Kumar, A., Vyas, V., Pathak, A., Kumar, P. Colloidal Chemistry Aspects of Nanotechnology. In Applications of Nanotechnology – 2021. – С. 49–64.
19. Артамонова О.В., Сергуткина О.Р., Коротких Д.Н., Чернышов Е.М. Золь-гель синтез наноразмерных частиц SiO<sub>2</sub> для модифицирования структуры цементного камня // Нанотехнологии в строительстве. 2010. Т. 2, № 1. С. 97–105. [http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild\\_2\\_2010.pdf](http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_2_2010.pdf).
20. Артамонова О.В., Сергуткина О.Р., Останкова И.В., Шведова М.А. Синтез нанодисперсного модификатора на основе SiO<sub>2</sub> для цементных композитов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16, № 1. С. 152–162.
21. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A. Regulation of the aggregate stability for binary polymer-mineral dispersions. Nanotechnologies in Construction. 2023; 15(3): 258–266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>. – EDN: ENKULB.
22. Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А., Малиновкер В.М., Крайний А.А., Городов А.И. Регулирование агрегативной устойчивости и реологических свойств дисперсий CaCO<sub>3</sub> добавкой на основе отходов производства пирокатахина // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–5. С. 948–952.
23. Полуэктова В.А. Закономерности поверхностных явлений и модифицирования полимерминеральных дисперсий для аддитивных технологий: дисс. ... д-р. техн. наук: 02.00.11. Белгород: БГТУ, 2021. 517 с.
24. Старченко С.А. Усовершенствование технологии получения суперпластифицирующего агента на основе 1,3,5-тригидроксibenзол-2-фураальдегидного олигомера, применяемого для иммобилизации радиоактивных и токсичных отходов: ВКР: 20.04.01. Белгород: БГТУ, 2020. 68 с.
25. Слюсарь А.А., Полуэктова В.А., Мухачева В.Д. Коллоидно-химические аспекты пластификации минеральных суспензий оксифенолфурфурольными олигомерами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 66–69.
26. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Белятинская Л.Н. Адсорбция оксифенолфурфурольных олигомеров на дисперсных материалах // Фундаментальные исследования. 2012. № 6(11). С. 1470–1474.
27. Полуэктова В.А., Кожанова Е.П., Кудина А.Е. Адсорбция флороглюцинолфурфурольных олигомеров на поверхности полимерминеральных дисперсий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. (10). С. 116–122. [https://doi.org/10.12737/article\\_59cd0c61195958.39964053](https://doi.org/10.12737/article_59cd0c61195958.39964053)
28. Комплексная добавка для бетонов строительной 3D-печати: пат. 2806395 Рос. Федерация / Полуэктова В.А., Старченко С.А., Кожанова Е.П.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. Заявка № 2023113979; заявл. 29.05.2023; опубл. 31.10.2023, Бюл. № 31.



#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Старченко Сергей Александрович** – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, sereja650@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4827-8322>

**Полуэктова Валентина Анатольевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, val.po@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8998-0698>

**Шаповалов Николай Афанасьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, shap.bstu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4624-3385>

**Кожанова Елизавета Петровна** – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, elizzinchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0112-0584>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Старченко С.А.** – проведение экспериментальной части исследования; написание исходного текста; анализ результатов исследования.

**Полуэктова В.А.** – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования.

**Шаповалов Н.А.** – концепция исследования; анализ результатов исследования.

**Кожанова Е.П.** – проведение экспериментальной части исследования.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.09.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024; принята к публикации 08.10.2024.



# Synergetic improvement of technological characteristics of highway road surfaces by bitumen microdispersed emulsions

Anton O. Glazachev<sup>1</sup> , Olga V. Ivanova<sup>1\*</sup> , Stanislav Yu. Pavlov<sup>2</sup> , Aleksandr S. Salov<sup>1</sup> ,  
Ranis M. Akhmetshin<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

<sup>2</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

\* Corresponding author: e-mail: [olgachemist@mail.ru](mailto:olgachemist@mail.ru)

## ABSTRACT

**Introduction.** The use of bitumen microdispersed emulsion as a resource-saving method for road surface construction is a popular trend in the development of innovative nanostructures. The technological use of petroleum bitumen as a binder for road materials requires a reduction in rheological viscosity. This can be achieved through synergistic developments that involve the use of various additives and modifiers. **Methods and materials.** The composition of bitumen microheterogeneous emulsions includes: bitumen-containing raw materials (up to 70–80% of mass); water with hardness up to 6 mg-eq/l (from 20 to 30%); emulsifiers (up to 3%) and other components. For large-tonnage production of water-bitumen emulsions, a colloid mill is the most technologically advanced equipment. Results. Water-bitumen emulsions are formed as a result of two competing processes: crushing (dispersion) and coalescence (merging) of microdroplets of the bitumen dispersed phase. The microheterogeneous bitumen phase is distributed in the aqueous dispersion medium in the form of microdroplets ranging in size from 1 to 10  $\mu\text{m}$  (the main share is made up of bitumen microdroplets with a diameter of 2–4.5  $\mu\text{m}$ ). The synergetic durable microstructure of asphalt concrete road surfaces, which is formed by supplementing interaction in the boundary layers of the bitumen binder with the surface of the mineral component, is determined by the dominant interaction of complementary factors. **Discussion.** The synergetic approach to extending the service life of asphalt concrete road surfaces by using bitumen microdispersed emulsions holds promise for interpreting their evolution. The road construction industry of the Russian Federation at the beginning of the 21<sup>st</sup> century is characterized by a large-scale revision of regulatory documents, regulating the requirements for the construction and operation of highways. **Conclusion.** The optimal solution to the current problems of intensive construction and reconstruction of Russian highways is the improvement of technological characteristics of road surfaces by adding bitumen microdispersed emulsions to the composition. In complementary strengthening of weak soils of the road surface of high-speed highways, the use of water-bitumen microdispersed emulsions is also recommended.

**KEYWORDS:** bitumen emulsion, asphalt concrete pavement, synergistic reinforcement, cationic emulsifier, road construction.

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The work was carried out within the framework of the implementation of the academic strategic leadership program "Priority 2030".

## FOR CITATION:

Glazachev A.O., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Salov A.S., Akhmetshin R.M. Synergetic improvement of technological characteristics of highway road surfaces by bitumen microdispersed emulsions. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(5): 463–472. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-463-472>. – EDN: MRDGYJ.

## INTRODUCTION

Innovative developments in emulsion nanotechnologies, which allow achieving resource-saving, technological and environmentally friendly construction of high-quality road surfaces, are among the most effective areas in the

construction of transport facilities. Microdispersed bitumen road emulsions are used in the technology of building Russian highways: they are effective for creating protective layers with a rough surface; preventive repair of deep potholes at low temperatures; environmentally friendly stabilization of slopes of the roadbed and shifting sands;



as a nanoadditive in the complex strengthening of weak soils of the roadbed (with lime, etc.); production of black crushed stone, and other porous, dense crushed stone and gravel-sand materials used in creating the structural layers of high-speed transport highways [1–4].

Resource-saving technological use of petroleum bitumen as road binders requires a reduction in rheological viscosity, which can be achieved by heating to 170°C, dissolving in hydrocarbon diluents and emulsifying in water [5–7]. Water-bitumen emulsions have been used for over a hundred years in road construction: pothole repair, laying of protective thin layers of road surfaces. The preparation of stable water-bitumen emulsions requires the use of effective surfactants - emulsifiers that stabilize the dispersion of bitumen microdroplets and provide stability during long-term storage such as cyclic amine with a stabilizer (block copolymer of ethylene oxide and propylene oxide) which can last up to 90 days [8]. Synergistic developments in improving the technological characteristics of highway road surfaces using bitumen microdispersed emulsions remain relevant.

The purpose of this article is to study effective methods of preparation and use of water-bitumen petroleum microdispersed emulsions in intensive construction and reconstruction of highways and transport infrastructure.

## METHODS AND MATERIALS

In road construction, the most technologically advanced method is the use of direct water-bitumen emulsions (the bitumen dispersed phase is distributed in the form of microdroplets measuring 1–20 µm in an aqueous dispersion medium). The amount of road petro-

leum bitumen (from CB (construction bitumen) 40/60 to CB 200/300) varies in microheterogeneous emulsion 30–80 mass %; soft water (hardness up to 6 mg-eq/l) 15–70 mass % (pH ≈ 7, neutral medium); emulsifier up to 3% mass %.

Small amounts of emulsifiers reduce the interfacial tension between water and immiscible bitumen, which promotes stable distribution of bitumen microdroplets in the aqueous phase. The efficiency of emulsification depends on the composite microstructure of road petroleum bitumen, macromolecular nanoadditives, physicochemical characteristics of the emulsifier, and the emulsification mode [9–11]. It has been established that in the case where the ratio of resins and oils in the bitumen petroleum binder exceeds 0.6, and the ratio of resins and asphaltenes is in the range from 0.5 to 2.0, then the bitumen will be effectively emulsified.

Emulsification (dispersion of bitumen components) is a process of physical crushing (grinding into microdroplets) carried out by various installations: colloid mills, ultrasonic dispersers, etc. For large-tonnage production of water-bitumen emulsions, a colloid mill is the most frequently used technological equipment. A colloid mill consists of a rapidly rotating rotor (angular velocity 2500–7000 rpm) and a stator; due to centrifugal forces, the bitumen component is split into microdroplets, which are coated with an electrically charged surface-active emulsifier. In the distribution of microdroplets by size (diameter of bitumen microdroplets), the following geometric characteristics of the production [12–14] colloid mill play an important role: the adjustable gap between the rotor and stator, which can vary from 0.25 to 0.5 mm, as well as the angular speed of rotation of the rotor (Fig. 1).

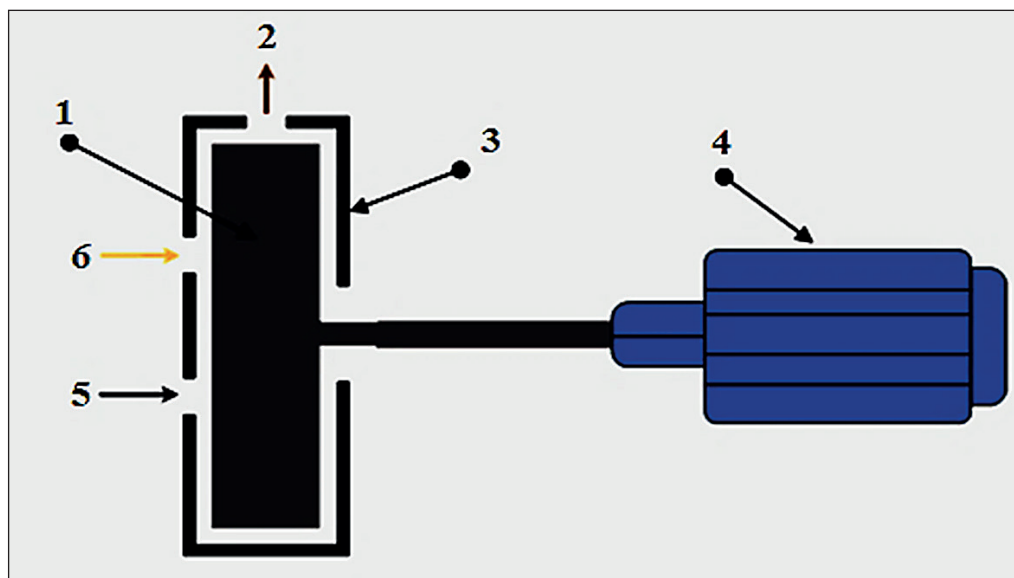


Fig. 1. Operation of a colloid mill in the process of producing water-bitumen emulsion: 1 – rotor, 2 – emulsion, 3 – stator, 4 – electric motor, 5 – bitumen, 6 – aqueous solution of emulsifier



First, a surface-active emulsifier in the form of an aqueous solution at a temperature of 50–70°C is fed into the colloid mill; then, molten bitumen at a temperature of 140–170°C, suitable for emulsification with a viscosity of about 0.2 Pa·s, is dosed into the colloid mill. Optimum emulsification (diameter of bitumen microdroplets 5–10 µm) in the colloid mill is achieved with a bitumen component content of no more than 70% and a temperature of no more than 90°C for 25–30 minutes. When this range is exceeded, the production of water-bitumen emulsion becomes ineffective due to the formation of larger bitumen microdroplets, and the prepared road emulsions lose stability when stored in a tank. Conditional viscosity level, adhesive properties, disintegration index, and stability are the main characteristics of bitumen emulsions within the framework of tightening requirements for digital control of the production of asphalt concrete road construction materials [15].

The main function of surface-active emulsifiers is to reduce the surface tension of water-bitumen emulsion and prevent the reverse adhesion of microdroplets. It should be noted that the physicochemical characteristics of emulsifiers have a significant effect on the properties of bitumen emulsion such as viscosity, aggregate stability, ability to break down and adhesion. Bitumen emulsifiers are divided into anionic, cationic, nonionic depending on the composition of the functional group [16].

At first, anionic emulsifiers were the most common in the preparation of water-bitumen road emulsions, but since the mid-20<sup>th</sup> century, cationic emulsifiers have been used more widely in large-scale production (3/4 of the volume of bitumen emulsions is cationic) [17]. The diphilic molecules of emulsifiers consist of polar (hydrophilic “head”) and hydrophobic (non-polar “tail”) parts; the non-polar part is oriented toward the bitumen component, and the hydrophilic part is oriented toward the aqueous phase (Fig. 2).

This synergetic behavior of emulsifier molecules can be explained by the fact that when the molecules concentrate on the interface of two liquid phases that form a mi-

croheterogeneous water-bitumen emulsion, they prevent the reverse fusion (coalescence) of bitumen microdroplets due to the double electric layer. Electrostatic repulsion and nanostructured characteristics of the double layer have a strong effect on the stability and viscosity of the bitumen emulsion. In road construction and reconstruction of highways, universal cationic emulsions are more often used in synergistic reinforcement. Cationic emulsifiers are alkylamines with a hydrocarbon chain of 8–22 atoms (the optimal number is 12–14) of carbon and primary amines ( $R-NH_2$ ), which provide a sufficiently high adhesion of the bitumen binder to the surface of mineral powders and crushed stone of acidic and basic nature.

The stability of the technical and economically effective water-bitumen emulsion is determined by the change in its homogeneity during storage, where emulsion samples can be held for a week or a month. The stability during transportation is determined after 2 hours of shaking the sample of water-bitumen emulsion, in this case, irreversible separation into bitumen and water should not occur. The normative technological determination of the properties of the bitumen component isolated from the emulsion is carried out after evaporation of water; the depth of penetration and extensibility should not decrease by more than 15% of the original bitumen.

A rather conventional classification of bitumen microdispersed emulsions is carried out by the type of emulsifiers: anionic, cationic, etc.; depending on the kinetic rate of disintegration when mixed with mineral powder and crushed stone: fast-, medium-, slow-disintegrating; modified (addition of complementary polymers), unmodified, etc. For example, the EBPRC F grade means emulsion bitumen-polymer for roads, cationic, fast-disintegrating.

For the technological preparation of emulsions, CBs (construction bitumen) of the following grades are used: CB 200/300, CB 90/130, CB 60/90, CB 40/60; the corresponding grade of bitumen is selected taking into account the climatic conditions of the construction area and the technological design of the synergetic reinforcement of the road surface. For example, for the construction of

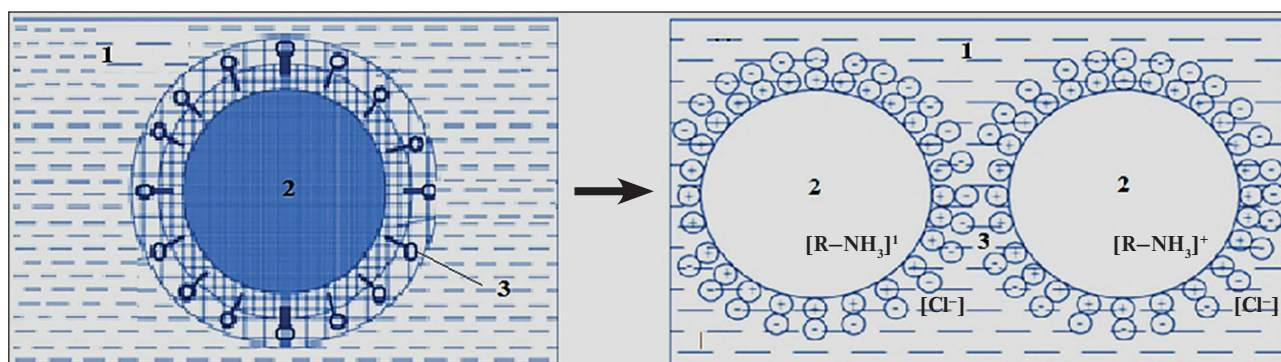


Fig. 2. **Formation of bitumen emulsion:** 1 – layers of aqueous phase adjacent to the hydrophilic part of the emulsifier; 2 – bitumen microdrop adsorbing the hydrophobic part of the emulsifier; 3 – emulsifier molecules



highways in the Republic of Bashkortostan, where winter temperatures usually drop below  $-20^{\circ}\text{C}$ , construction bitumens CB 90/130, CB 130/200, CB 200/300 are used.

For synergistic improvement of technological characteristics, water-bitumen emulsion is modified with polymer nanoadditives (latex, polyethylene, epoxy resin, synthetic rubber, synthetic resin, etc.). Aggregate modification of water-bitumen emulsion with macromolecular nanocomponents is carried out in two ways: by introducing a modifying additive into the aqueous phase of the emulsion or directly into the emulsion during its preparation using emulsification of modified bitumen in polymineral dispersions [18].

## RESULTS

Bitumen road emulsions are colloidal emulsions, where the microheterogeneous bitumen phase is distributed in an aqueous dispersion medium in the form of microdroplets with a size of 1 to 10  $\mu\text{m}$  (the main share is made up of bitumen microdroplets with a diameter of 2–4.5  $\mu\text{m}$ ). Figure 3 shows an optical micrograph (Axio Scope.A1 microscope) of the microstructure of bitumen emulsions (the amount of CB 70/100 road bitumen is 61%, the emulsifier Sinterol is 1.8%).

Water-bitumen emulsions are formed as a result of two competing processes: crushing (fine dispersion) and coalescence (merging) of microdroplets of the bitumen dispersed phase. Adsorption of amphiphilic molecules of emulsifiers on the interface of water-bitumen phases and formation of a double electric layer always occurs over a certain period of time. It should be noted that in addition to the presence of emulsifiers, the stability of

bitumen emulsions is affected by: temperature, mineralization and acidity of the aqueous phase, concentration of microdroplets of the dispersed phase and their sizes, Brownian chaotic motion, density, viscosity, etc.

Controlled disintegration of water-bitumen emulsion is a kinetic process of bitumen component release from emulsion after application to highway road surface or combination of bitumen emulsion and mineral material which is also correctly interpreted within the framework of fractal analysis. Synergistic microstructure of asphalt concrete pavements, which is formed by complementary interaction in the boundary layers of bitumen binder with the surface of the mineral component, is determined by the dominant interaction of complementary factors. In most cases, stone materials, such as mineral powders and crushed stones, have negative surface charges, and positively charged emulsifier is attracted electrostatically to synergistic filler, causing controlled disintegration of water-bitumen emulsion (Fig. 4). Synergistic improvement of technological characteristics of road asphalt concrete occurs as a result of formation of continuous films of adsorbed bitumen.

A special feature of the technology of surface treatment of highways using emulsion-mineral mixtures is the need to find the optimal range of time for controlled disintegration of the water-bitumen emulsion in the composition used, i.e. the time from the moment the mixture is prepared until a solid-phase state is achieved. Controlled degradation of the emulsion should occur after the distribution of the synergistic emulsion-mineral mixture over the surface of the asphalt concrete pavement: with a faster disintegration, the mixture will prematurely thicken in the asphalt paver and will become unable to be paved,

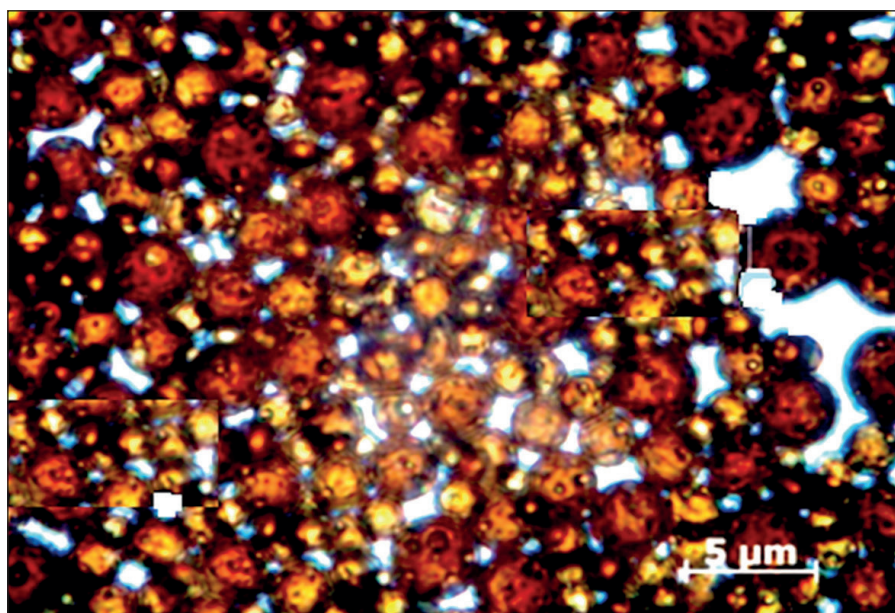


Fig. 3. Micrograph of water-bitumen emulsion (magnification in an optical microscope  $\times 1000$ )



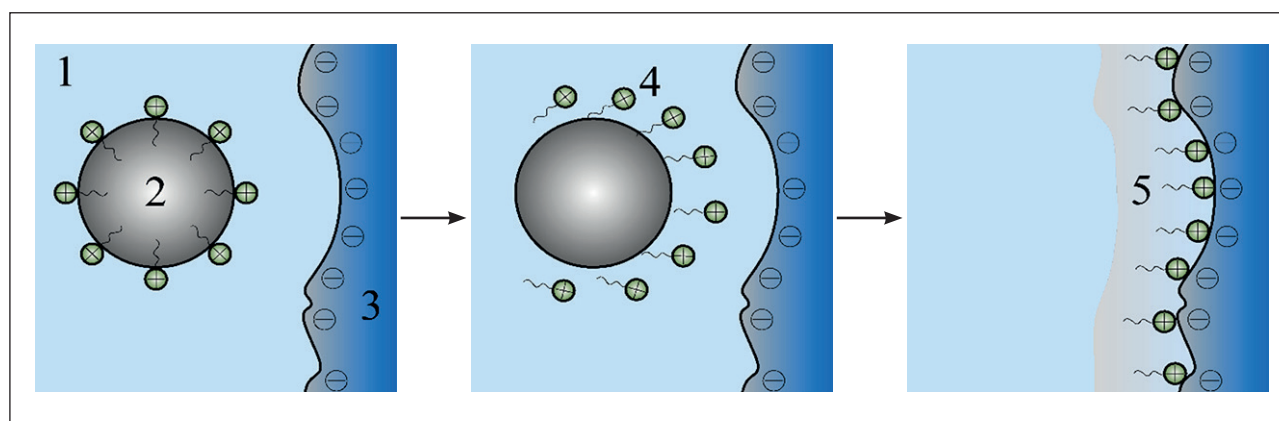


Fig. 4. **Disintegration of bitumen microdispersed emulsion:** 1 – aqueous phase; 2 – bitumen microdroplet; 3 – mineral powder; 4 – emulsifier molecules, 5 – adsorbed bitumen film

and with a slower one, the liquid composition will flow off the surface of the road pavement.

Cationic bitumen emulsions are divided by the rate of disintegration during processing of mineral complementary materials into: fast-disintegrating – 5–15 minutes, medium-disintegrating – several hours and slow-disintegrating – 1–2 days [19]. To determine the kinetic rate of disintegration of fast-disintegrating water-bitumen microdispersed emulsions, it is recommended to use quartz powder, the mass fraction of which is less than 50%. According to technological characteristics, the expected stability of bitumen road emulsion during transportation should be at least 2 hours. When optimally formulating asphalt concrete emulsions, it is necessary to take into account the stability during storage; bimodal emulsions may have a lower viscosity than monomodal analogues, but have higher stability during storage and transportation [20].

## DISCUSSION

The road surface of transport highways directly perceives the impact of physical and mechanical loads, atmospheric factors and determines the most important operational qualities of the road, in the construction of which synergetic bitumen microdispersed emulsions were used. Forecasting the durability of asphalt concrete road surfaces is a fairly significant problem, since it is associated with: the diversity of various external factors (ground transport, weather conditions, etc.) that are difficult to analytically describe mathematically; insufficiently studied internal physical and chemical structuring processes in composite asphalt concrete. The synergetic concept [21] is promising for interpreting the evolution of asphalt concrete road surfaces of highways constructed using water-bitumen emulsions.

Synergetic enhancement of technological characteristics of asphalt concrete pavements, which is formed by in-

teraction in boundary layers of bitumen structured binder with the surface of the mineral component, is determined by dominant interaction of complementary factors. Fractal concepts of long-term strength of asphalt concrete road pavement of highways are reflected in the levels of power dependence of nonlinear deformation under load, characterizing entropic nature of elasticity and kinetics of damage or hidden destruction of microstructure from load. Long-term strength of asphalt concrete pavement is characterized by activation energy, determining thermal fluctuation rupture of bitumen bonds at the nanolevel, as well as fractal dimension of asphalt concrete microstructure, determining usage patterns during deformation under load [22]. The main reason for the optimal choice of synergetic technology for the installation of protective wear-resistant layers of asphalt concrete road surfaces using water-bitumen emulsions is to ensure the safe movement of ground transport during the standard service life [23, 24].

In 2020, the annual global production and use of bitumen emulsions in road construction amounted to more than 7 million tons, amounting to 33% in the USA and 16% in France. In the Russian Federation about 250 thousand tons were produced. When choosing the type and brand of water-bitumen emulsion in the process of synergistic improvement of the technological characteristics of road surfaces, the purpose of microdispersed emulsions should be taken into account.

The main advantage of using water-bitumen microdispersed emulsions compared to traditional (hot, liquefied) road bitumens is the convenience in handling of the material [25]: only a sufficiently complete adhesion of the negatively charged surface of the road base with a positively charged cationic emulsion is needed for operation; technological production of bitumen emulsions allows varying the qualitative composition and required characteristics; the use of bitumen emulsions at temperatures from 30°C to 70°C is safe for use and reduces energy consumption



by 40–50%; it is permissible to pour bitumen emulsions onto moistened surfaces with the formation of a strong and water-resistant bitumen film on the complementary surface of mineral fillers. In addition, it is worth noting the technological environmental friendliness of the multi-tonnage preparation and use of water-bitumen emulsion: a minimal volume of harmful substances such as hot and liquefied bitumen is released into the atmosphere, and in addition, production becomes fire- and explosion-proof.

For the road construction industry of the Russian Federation, the beginning of the 21<sup>st</sup> century is characterized by a large-scale transformation of regulatory documents (GOST 18689-81, 52128-2003, 58952.1-2020) regulating the requirements for the construction and operation of high-speed highways, which are mainly represented by individual sections of federal highways. Conversion to a fluid state, i.e. emulsification of water-bitumen binders at ambient temperature, requires stability during storage and transportation, with simultaneous destruction at a controlled speed during synergistic application to the surface of mineral fillers or road asphalt concrete pavement. One of the constraints for the use of resource-saving nanotechnologies in Russia is the lack of production of effective domestic cation-active emulsifiers and the high cost of imported analogues. However, fairly inexpensive and affordable raw materials have been proposed for the production of the emulsifier: polyamides and products containing fatty acids.

For the synergistic preparation of cast emulsion-mineral mixtures for road purposes, slowly disintegrating cationic bitumen or bitumen-polymer emulsions should be used [26]. Complementary introduction of styrene-

butadiene latexes up to 5% does not have a significant effect on the homogeneity and stability of water-bitumen emulsions: the most effective is the SKS-65GP latex, since more than 90% of the ultradisperse particles are less than 100 nm in size [27]. The addition of styrene-butadiene latexes has a positive synergistic effect on the main technological characteristics of water-bitumen bitumen compositions, which is manifested in a significant increase in heat resistance up to 100°C, frost resistance up to –15°C, elasticity up to 44%, softening temperature and hardness.

Water-bitumen emulsions are thermodynamically unstable – they are characterized by fractal aggregation of microdroplets of the dispersed phase and the processes of reverse sedimentation, i.e. coalescence. It should be noted that, in turn, bitumen binders are petroleum nano-dispersions, the properties of which are determined by nanoparticles of the dispersed phase and the hydrocarbon dispersion medium [28]. Multi-tonnage bitumen road microdispersed emulsions according to GOST R 58952.1-2020 are divided into: emulsions bitumen anionic (EBA) and emulsions bitumen cationic (EBC).

To date, various methods have been proposed for using water-bitumen emulsions for road construction as a structured complementary binder; recommended areas of use of grades of bitumen road emulsions are given in Table 1.

The data in the table shows that water-bitumen road emulsions are most often used for synergetic priming before applying the upper layer of asphalt concrete, pothole repair and liquid phase surface treatment of road surfaces. For complementary strengthening of slopes of soil

Table 1

Recommended application areas for various grades of road bitumen emulsions

Emulsion grades	Application area of water-bitumen emulsions
EBC-1 EBPC-1	Sub-priming (pouring of liquid-phase bitumen emulsion) of road surfaces of transport highways, installation of protective surface treatment.
EBC-2 EBPC-2	Technological installation of upper layers of road surfaces by the impregnation method; optimized technology for the preparation of black crushed stone and porous crushed stone mixtures; patching of potholes in highways.
EBC-3 EBPC-3	Installation of thin-layer rough wear layers of road surfaces; technological production of dense water-bitumen emulsion- mineral mixtures, including soil mixtures; reinforcement of slopes.
EBPA-1	Liquid-phase sub-priming; reinforcement of the surface of slopes of the roadbed; installation of wear-resistant surface treatment.
EBA-2 EBPA-2	Technological care of freshly laid cement concrete road surface; preparation of black crushed stone and porous crushed stone mixtures from carbonate rocks; construction of road surfaces by impregnation method.
EBA-3 EBPA-3	Optimized production of emulsion-mineral mixtures of dense composition with mandatory introduction of 1-2% lime or 2-3% cement; fixation of shifting sands and weak soils of the upper layers of the roadbed.



embankments of steep highways and from clayey weak soils, it is recommended to use water-bitumen emulsions EBA-3 with a bitumen concentration of 50–55%; for gentle and sandy slopes – a microdispersed emulsion with a bitumen phase concentration of 40–50%.

It should be noted that according to the synergistic efficiency of mixing with various mineral fillers, the following classes of water-bitumen emulsions are distinguished: cationic – (EBC-1, EBC-2 and EBC-3) and polymer-modified emulsions (EBPC-1, EBPC-2, EBPC-3); anionic (EBA-1, EBA-2 and EBA-3). The grades of classes EBC-1 (EBPC-1), EBC-2 (EBPC-2), EBC-3 (EBPC-3) correspond to fast, medium and slow rates of disintegration when mixing road bitumen microdispersed emulsions with mineral complementary materials of different granulometric composition.

The complementary components in the composition of water-bitumen emulsion of EBC grades perform synergistic functions: improving complementary adhesion; achieving the required consistency; improving the technological characteristics of wear resistance, plasticity, frost resistance through supramolecular improvement of the road surface of the transport infrastructure with polymer nanocomposites [29]. Regardless of the rate of disintegration, the grades of water-bitumen emulsions have approximately the same concentration of bitumen, viscosity, extensibility, and softening temperature. Technological differences are manifested in the ability to complementarily mix with particles of dense (gravel, crushed stone) and porous (expanded clay gravel) minerals: the EBC-3 water-bitumen emulsion grade is universal for mixing, the EBC-1 grade is not very suitable for this, and EBC-2 interacts well with a porous filler.

A complementary feature of using water-bitumen emulsion of EBC grades is that after application the constituent components are separated into two layers: water evaporates, and the bitumen binder hardens, forming a strong bitumen film on the synergistic surface of the mineral filler with the required performance characteristics [30]. The electrokinetic rate of controlled disintegration determines the optimal scope of use of the water-bitumen emulsion grade: EBC-1 is used for liquid-phase treatment of the surface layer of road protective coatings to improve adhesion; priming of asphalt concrete layers to improve adhesion between them; impregnation of crushed stone layers when laying road surfaces, as well as road potholes during repairs. The EBC-3 brand is used to create a protective layer of road surfaces; a complementary mixture with any mineral filler, and EBC-2 is used for the technological design of an optimal mixture with a porous mineral filler.

The mineral part of emulsion-mineral mixtures used for surface treatments is synergistically selected according to the technological principle and consists of crushed stone mixtures (with of 5–10 mm or 5–15 mm fraction),

crushed (or a mixture of both natural 2–5 mm fraction and crushed) sand and mineral powder. The optimal amount of crushed stone and the technological ratio of natural and crushed sand in optimized emulsion-mineral mixtures is selected depending on the granulometric composition and the required coefficient of adhesion of the highway road surface. Complementary mineral powder is added to the emulsion-mineral mixture in an amount such that the content of particles smaller than 0.071 mm is within 5–15% range.

In addition to the above-mentioned mineral materials, man-made wastes can be synergistically used in cast emulsion-mineral mixtures: ash-slag, lime-containing materials, etc. [31–33]. Rational replacement of high-strength expensive stone materials with autochthonous soils reinforced with strengthening binders based on production waste in structural layers of pavements for category IV and V highways allows to reduce not only the cost of road construction by 30–50%, but also the man-made load on the surrounding ecological environment of the regions of the Russian Federation.

In Bashkortostan, the Remstroydormash plant (Ufa) produces water-bitumen emulsions EBRC-F (EBC-1), EBRC-Semulsiya (EBC-2), EBRC-S (EBC-3) for pothole repair, priming and recycling. Modern equipment allows using high-quality synergistic ingredients to produce up to 10 tons of bitumen microdispersed emulsions per hour. The Remstroydormash plant pours water-bitumen emulsion into 200-liter barrels to meet the needs of small businesses that repair roads, parking lots, and local areas in small areas where the use of a tar sprayer is economically impractical. It should be noted that small contractors, in order to reduce the cost of road construction, produce emulsions on their own sites, purchasing road bitumen at nearby oil refineries (in Ufa, in Salavat). In this case, of course, it is difficult to comply with the regulatory technological requirements for high-quality synergetic preparation of water-bitumen emulsions.

In the context of achieving technological sovereignty of the Russian Federation, it is recommended to use quaternary ammonium salts (for example, alkyltrimethylammonium chloride) in the amount of 0.2–0.5% of the water mass as import-substituting cationic emulsifiers. There are encouraging results of using bitumen microdispersed emulsions in the technology of strengthening weak soils of the roadway.

The most productive technology for synergetic strengthening of soil embankments and reconstruction of transport highways with bitumen microdispersed emulsions is the use of specialized machines – recyclers. More universal and technically and economically advantageous recyclers are road machines with one working element of the milling-rotor type, which are equipped with speed sensors and a metered system for feeding water-bitumen microdispersed emulsion (Fig. 5).



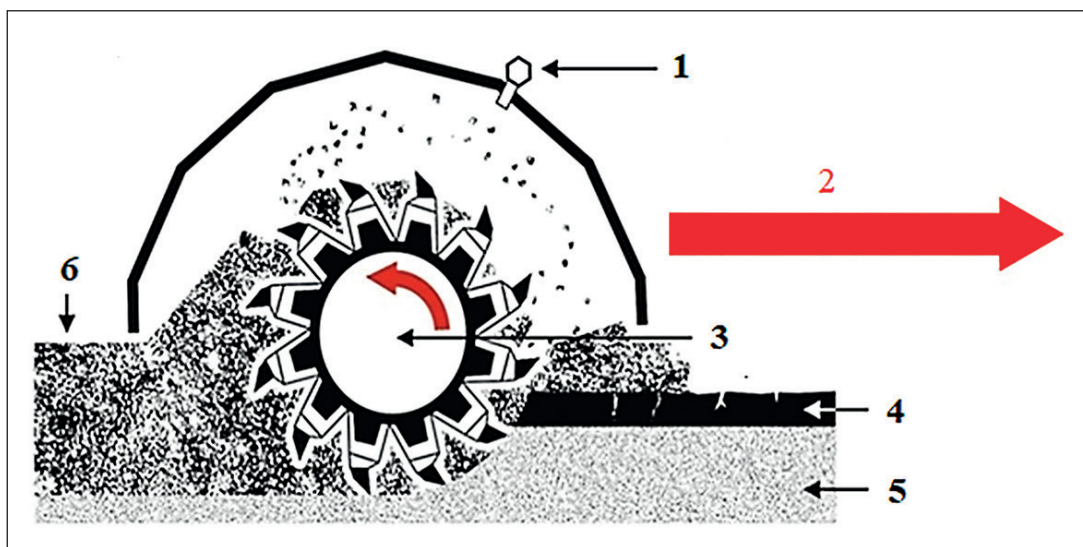


Fig. 5. **Operation of a road recycler:** 1 – injection of bitumen emulsion; 2 – direction of movement; 3 – milling and mixing drum; 4 – destroyed asphalt concrete layer; 5 – road surface; 6 – recycled highway layer

Optimal surface treatment from crushed stone emulsion-mineral mixtures is recommended for usage to ensure the required coefficient of adhesion on emergency sections of highways, and for sand emulsion-mineral mixtures to be used on sections of transport highways with difficult traffic conditions and as a protective wear-resistant layer. For synergetic usage of surface treatment of road surfaces of transport infrastructure, it is necessary to use emulsion-mineral mixtures of cast consistency, consisting of mineral materials (crushed stone, sand, mineral powder) and cationic water-bitumen microdispersed emulsion.

It should also be noted that road surfaces in the process of technological operation are under the influence of many multidirectional factors: soil-geological and hydrological conditions, terrain, weather-climatic and physical-mechanical, caused by excessive loads from heavy vehicles. Critical changes in the water-thermal regime of the road surface significantly affect the strength, synergistic durability of the road and lead to a decrease in the transport and operational characteristics of high-speed highways. At the nanolevel of asphalt concrete pavement of the order of  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  m, an accelerated process of

rupture of chemical bonds between atoms of the bitumen binder occurs, which leads to a sharp deterioration in adhesive and cohesive characteristics [34, 35]. The currently known methods of technological monitoring of road surfaces have certain limits of applicability, therefore the synergistic approach complements and combines complementary factors.

## CONCLUSION

Asphalt concrete road surface is a nonlinear system, and changes in its operational technological characteristics are accompanied by non-additive synergistic effects. Synergistic enhancement of the technological characteristics of road surfaces by adding bitumen microdispersed emulsions to the composition provides an alternative approach, in which bitumen is liquefied by dispersion in water; an optimal solution to the problems of intensive construction and reconstruction of Russian highways. Water-bitumen microdispersed emulsions with microdroplets of 2–4.5  $\mu\text{m}$  in diameter are recommended for the popular technology of complementary strengthening of weak soils of the road surface of high-speed highways.

## REFERENCES

1. Karpenko F. V., Gureev A. A. Bitumen emulsions. Fundamentals of physical and chemical technology of production and application. Moscow: 1998.
2. Abdullin A.I., Idrisov M.R. Bitumen emulsions in road construction. Bulletin of Kazan Technological University. 2011; 23: 124–128.
3. Evdokimova N.G., Luneva N.N., Egorova N.A., Makhmutova A.R., Bayguzina Yu.A., Imangulova E.A. On the choice of technology for the production of polymer-bitumen binders as innovative nanobinders for the construction of



asphalt concrete pavements // Nanotechnology in Construction. 2018; 10(5): 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>

4. Zemlyakov A.Yu., Lobankov E.V., Romadenkina S.B. Development of bitumen emulsion compositions for road construction. Bashkir Chemical Journal. 2019;26.3 :52–57. <https://doi.org/10.17122/bcj-2019-3-52-57>

5. Budnik V.A., Evdokimova N.G., Pushkareva T.V. Processes of bitumen emulsification in water and methods of their improvement. Electronic scientific journal Oil and Gas Business. 2008; 1: 32.

6. Opasenko O.N., Krutko N.P. Properties and application of bitumen dispersions and bitumen-emulsion materials. — Minsk: Belaruskaya Navuka, 2014. — 270 p.

7. Tyukilina P.M., Gureev A.A., Tyshchenko V.A. Production of oil road binders. Moscow: Nedra, 2021. 303 p.

8. Abdullin A.I., Dyakonov G.S., Idrisov M.R., Abdullin I.A., Gatiyatullin M.Kh. Bitumen emulsion for road surfaces. RF Patent 2505570. Publ. 01/27/2014.

9. Polezhaeva N.I. Physicochemistry of oil dispersed systems. Oil dispersed structures. Krasnoyarsk: Siberian State University named after M.F. Reshetnev; 2022.

10. Glazachev A.O., Ivanova O.V., Sinitsyn D.A., Akhmetshin R.M. Complementary improvement of technological characteristics of asphalt concrete road pavements by macromolecular nanocomposites. Nanotechnology in Construction. 2023; 15(5): 453–464. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-453-464>

11. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. Innovative trends in the efficient preparation of bitumen emulsions in road construction. Trends in the development of science and education. 2024; 112-6: 139–142.

12. Gingras J.-P., Tanguy P.A., Mariotti S., Chaverot, P. Effect of process parameters on bitumen emulsions. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005; 44(9): 979–986. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.01.003>

13. Evdokimova N.G., Egorova N.A., Sultanova D.P., Kunakulova E.M., Serezhkina N.G. Formation of sol-gel nanostructure of road bitumen by the method of selection of group chemical composition. Nanotechnology in Construction. 2019; 11(5): 512–525. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-512-525>

14. Xu L., Hou X., Li X., Xiao F. Impact of constituent migration on colloid structure and rheological characteristics of emulsified asphalt with self-crosslinking modifiers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021; 619: 126530. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126530>

15. Pudovkin A.N., Khalikov R.M., Bulatov B.G., Sokolova V.V., Nedoseko I.V. Digital control of parameters in the automated control system for the production of asphalt concrete mixture. Electrical and information complexes and systems. 2021; 17; 3-4: 103–113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113>

16. Ayar P. Effects of additives on the mechanical performance in recycled mixtures with bitumen emulsion: An overview. Construction and Building Materials. 2018; 178:551–561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.174>

17. Ignatiev A.A. Asphalt concrete additives. Literature review. Izvestiya KGASU. 2023; 1 (63): 14–30. [https://doi.org/10.52409/20731523\\_2023\\_1\\_14](https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14)

18. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A. Regulation of the aggregate stability of binary polymer-mineral dispersions. Nanotechnology in Construction. 2023; 15(3): 258–266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>. — EDN: EHKULB.

19. Usov B.A., Gorbunova T.N. Properties and modification of bitumen binders. System technologies. 2017; 1 (22): 72–88.

20. Querol N., Barreneche C., Cabeza LF Storage stability of bimodal emulsions vs. monomodal emulsions. Applied Sciences. 2017; 7(12): 1267. <https://doi.org/10.3390/app7121267>

21. Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Synergetic approach to modeling physical wear of engineering systems. Bulletin of MGSU. 2015; 5: 93–102.

22. Kiryukhin G.N. Thermal fluctuation and fractal model of durability of asphalt concrete. Roads and bridges. 2014; 1 (31): 247–268.

23. Khalikov R.M., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. Qualitative improvement of technological characteristics of asphalt concrete road pavements with complementary innovative additives. Trends in the Development of Science and Education. 2023; 103-7: 119–122. <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2023-425>.

24. Glazachev A.O., Pavlov S.Yu., Ivanova O.V., Khalikov R.M. Synergetic technologies for designing wear-resistant layers of asphalt concrete pavements of highways. Trends in the Development of Science and Education. 2024; 106-9: 22–25. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2024-481>.

25. Bismukhametova G.K., Emelyanycheva E.A., Abdullin A.I., Sibgatullina R.I. Bituminous materials in road construction. Application of water-bitumen emulsions. Bulletin of the Technological University. 2015;18(20): 128–131.

26. Korotkov A.V., Kotlyarsky E.V., Gridchin A.M. Requirements for bitumen emulsions for the preparation of cast emulsion-mineral mixtures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010; 1: 10–12.



27. Murafa A.V., Makarov D.B., Nuriev M.A., Khozin V.G. Nanomodified bitumen emulsions for construction purposes. *Izvestiya KSUACE*. 2010; 2(14):245–249.
28. Evdokimova N.G., Luneva N.N., Egorova N.A., Makhmutova A.R., Bayguzina Yu.A., Imangulova E.A. On the choice of technology for the production of polymer-bitumen binders as innovative nanobinders for the construction of asphalt concrete pavements. *Nanotechnology in Construction*. 2018; 10(5): 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>
29. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Glazachev A.O. Supramolecular improvement of technological parameters of asphalt concrete road surfaces by polymer nanocomposites. *Actual problems of technical, natural and humanitarian sciences: Proc. of the International. Conf. Ufa: USPTU*; 2022:432–436.
30. Lyshchik P.A., Bavbel E.I., Naumenko A.I., Tsvirko M.V. Strengthening of road soils with bitumen emulsion. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources*. 2018; 2 (210): 168–173.
31. Gritsuk A.I., Tumanova S.A., Chargazia T.Z., Borodai D.I., Stukalov A.A. Efficiency of using ash and slag in road construction. *Economics of construction and urban management*. 2017; 13(1): 81–91.
32. Khalikov RM, Pavlov SY, Glazachev A. O., Akhmetshin RM Supramolecular mechanism for strengthening clay foundations of highways with complementary nanoadditives. *Trends development sciences and education*. 2024; 107-9: 83–85.
33. Stepanov S.V., Petrovpavlovskikh O.K., Kopylov M.A. Use of metallurgical industry waste in transport construction. *Highways and transport infrastructure*. 2024; 2 (6): 29–36.
34. Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Interpretation of the properties of asphalt concrete in road surfaces. *Construction materials*. 2015; 4: 87–92.
35. Smirnov V.A., Korolev E.V., Danilov A.M., Kruglova A.N. Fractal analysis of the microstructure of nanomodified composite. *Nanotechnology in construction*. 2011; 3(5) :78–86.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anton O. Glazachev** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Highways, Bridges and Transport Structures, Institute of Architecture and Civil Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, [anton.glazachev@mail.ru](mailto:anton.glazachev@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-4036-3155>

**Olga V. Ivanova** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Operation of Ground Transport in the Oil and Gas Industry and Construction, Institute of Architecture and Civil Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, [olgachemist@mail.ru](mailto:olgachemist@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6678-8369>

**Stanislav Yu. Pavlov** – Cand. Sci. (Leg.), Associate Professor, Department of Financial and Administrative Law, Institute of Law, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, [sta227@yandex.ru](mailto:sta227@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4201-7401>

**Aleksandr S. Salov** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Highways, Bridges and Transport Structures, Institute of Architecture and Civil Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, [salov@list.ru](mailto:salov@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7003-3022>

**Ranis M. Akhmetshin** – Senior Lecturer, Department of Highways, Bridges and Transport Structures, Institute of Architecture and Civil Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, [ranisahmetshin@mail.ru](mailto:ranisahmetshin@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-3269-3596>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Anton O. Glazachev** – scientific supervision, processing of results.

**Olga V. Ivanova** – conceptual editing, writing and translation of the text.

**Stanislav Yu. Pavlov** – collection and analytical processing of regulatory documents.

**Aleksandr S. Salov** – development of methodology, editing of the text.

**Ranis M. Akhmetshin** – graphical representation of research results.

**The authors declare no conflict of interest.**

The article was submitted 06.09.2024; approved after reviewing 02.10.2024; accepted for publication 08.10.2024.








Научная статья

УДК 625.85: 665.775.5

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-463-472>

CC BY 4.0

## Синергетическое улучшение битумными микродисперсными эмульсиями технологических характеристик дорожных покрытий транспортных автомагистралей

Антон Олегович Глазачев<sup>1</sup> , Ольга Владимировна Иванова<sup>1\*</sup> , Станислав Юрьевич Павлов<sup>2</sup> ,  
Александр Сергеевич Салов<sup>1</sup> , Ранис Мидхатович Ахметшин<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [olgachemist@mail.ru](mailto:olgachemist@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ресурсосберегающий способ конструирования дорожных покрытий с использованием битумных микродисперсных эмульсий является востребованной тенденцией создания инновационных наноструктур. Технологичное использование нефтяных битумов в качестве вяжущих дорожных материалов требует уменьшения реологической вязкости, что может достигаться синергетическими разработками. **Методы и материалы.** В состав битумных микрогетерогенных эмульсий входят битумосодержащее сырье (30–80 масс. %), мягкая вода с жесткостью до 6 мг-экв/л (15–65 масс. %), эмульгаторы (до 3%) и др. компоненты. Для многотоннажного производства водно-битумных микродисперсных эмульсий коллоидная мельница является наиболее технологичным оборудованием. **Результаты.** Водно-битумные эмульсии образуются в результате двух конкурирующих процессов: дробления (диспергирования) и коалесценции (слияния) микрокапель битумной дисперсной фазы. Микрогетерогенная битумная фаза распределена в водной дисперсионной среде в виде микрокапель размером от 1 до 10 мкм (основную долю составляют битумные микрокапли диаметром 2–4,5 мкм). Синергетическая долговечная микро-структура асфальтобетонных дорожных покрытий, которая формируется дополняющим взаимодействием в приграничных слоях битумного вяжущего с поверхностью минерального компонента, определяется доминирующим взаимодействием комплементарных факторов. **Обсуждение.** Перспективным для интерпретации эволюции асфальтобетонного дорожного покрытия с использованием битумных микродисперсных эмульсий является синергетическая концепция в рамках удлинения сроков эксплуатации автомагистралей. Дорожно-строительная отрасль Российской Федерации начала 21 века характеризуется масштабной переработкой нормативных документов, регламентирующих требования к строительству и эксплуатации автодорог. **Заключение.** Оптимальным решением актуальных проблем интенсивного строительства и реконструкции автомобильных дорог России является сбалансированное улучшение технологических характеристик дорожных покрытий добавлением в состав битумных микродисперсных эмульсий. В комплементарном укреплении слабых грунтов дорожного полотна скоростных автомагистралей также рекомендуется использование водно-битумных синергетических эмульсий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** битумная эмульсия, асфальтобетонное покрытие, синергетическое усиление, катионный эмульгатор, дорожное строительство.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена в рамках реализации программы академического стратегического лидерства «Приоритет 2030».

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Глазачев А.О., Иванова О.В., Павлов С.Ю., Салов А.С., Ахметшин Р.М. Синергетическое улучшение битумными микродисперсными эмульсиями технологических характеристик дорожных покрытий транспортных автомагистралей // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т.16, № 5. С. 463–472. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-463-472>. – EDN: MRDGYJ.



## ВВЕДЕНИЕ

Инновационные разработки эмульсионных нанотехнологий, которые позволяют достигать ресурсосбережения, технологичности и экологичности конструирования высококачественных дорожных покрытий, являются одними из самых эффективных направлений в строительстве транспортных сооружений. Микродисперсные битумные дорожные эмульсии используются в технологии строительства и реконструкции автодорог России: эффективного устройства защитных износостойких слоев с шероховатой поверхностью; в профилактическом ремонте глубоких выбоин при низких температурах; экологичном закреплении грунтовых откосов земляного полотна; в качестве нанодобавки при комплексном укреплении слабых грунтов дорожного полотна (известью и др.); в производстве черного щебня, пористых, плотных щебеночных и гравийно-песчаных материалов, используемых при устройстве конструктивных слоев транспортных скоростных магистралей [1–4].

Ресурсосберегающее технологичное использование нефтяных битумов в качестве вяжущих дорожных материалов требует уменьшения реологической вязкости, что может достигаться нагревом до 170°C, растворением в углеводородных разбавителях и эмульгированием в воде [5–7]. Водно-битумные эмульсии используются уже более ста лет в дорожно-строительных работах: ямочном ремонте, укладке износостойких защитных тонких слоев дорожных покрытий. Результативное приготовление стабильных водно-битумных эмульсий требует использования эффективных поверхностно-активных веществ – эмульгаторов, которые стабилизируют дисперсность битумных микрокапель и придают устойчивость при длительном хранении: например, циклический амин и стабилизатор (блок-сополимер этиленоксида и пропиленоксида) до 90 дней [8]. Синергетические разработки усовершенствования технологических характеристик дорожных покрытий автомагистралей битумными микродисперсными эмульсиями остаются актуальными.

Цель данной статьи – исследование результативных способов приготовления и использования водно-битумных нефтяных микродисперсных эмульсий в интенсивном строительстве и реконструкции автомобильных дорог и транспортной инфраструктуры.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В дорожном строительстве наиболее технологично использование прямых водно-битумных эмульсий (битумная дисперсная фаза распределена в виде микрокапелек размерами 1–20 мкм в водной дисперсионной среде). Количество дорожных нефтяных битумов (от

БНД 40/60 до БНД 200/300) варьирует в микрогетерогенной эмульсии 30–80 масс. %; мягкой воды (жесткость не более 6 мг-экв/л) 15–65 масс. % (рН ≈ 7, среда нейтральная); эмульгатора до 3% масс. %.

Небольшие количества эмульгаторов снижают межфазное натяжение между водой и несмешиваемым битумом, что способствует устойчивому распределению битумных микрокапель в водной фазе. Эффективность эмульгирования зависит от составной микроструктуры дорожного нефтяного битума, макромолекулярных нанодобавок, физико-химических характеристик эмульгатора, а также режима эмульгирования [9–11]. Установлено, что в случае, когда соотношение компонентов смол и масел в битумной нефтяной вяжущей превышает 0,6, а пропорция смол и асфальтенов находится в диапазоне от 0,5 до 2,0, битумный компонент будет результативно эмульгирован.

Эмульгирование (диспергирование битумных жидкофазных компонентов) – процесс физического дробления (измельчения в микрокапли) осуществляется различными установками: коллоидными мельницами, ультразвуковыми диспергаторами и т.п. Для многотоннажного производства водно-битумных эмульсий коллоидная мельница является наиболее часто используемым технологичным оборудованием. Коллоидная мельница состоит из быстро вращающегося ротора (угловая скорость 2500–7000 об/мин) и статора; благодаря центробежным силам битумный компонент расщепляется в микрокапли, которые покрываются электрически заряженным поверхностно-активным эмульгатором. В распределении микрокапель по размерам (диаметр битумных микрокапель) важную роль играют геометрические характеристики производственной [12–14] коллоидной мельницы: регулируемый зазор между ротором и статором составляет от 0,25 до 0,5 мм, а также угловая скорость вращения ротора (рис. 1).

Сначала в коллоидную мельницу поступает поверхностно-активный эмульгатор, в форме водного раствора температурой 50–70°C; затем в коллоидную мельницу подается дозированно расплавленный битум при температуре 140–170°C, подходящий для эмульгирования вязкостью около 0,2 Па·с. Оптимальное эмульгирование (диаметр битумных микрокапель 5–10 мкм) в коллоидной мельнице осуществляется при содержании битумного компонента не больше 70% и температуре не выше 90°C в течение 25–30 минут. При выходе из этого диапазона производство водно-битумной эмульсии становится неэффективным из-за формирования более крупных битумных микрокапель, а приготовленные дорожные эмульсии теряют стабильность при хранении в резервуаре. Показатели условной вязкости, адгезионные свойства, индекс распадаемости, стабильность являются основными характеристиками битумных эмульсий в рамках уже-



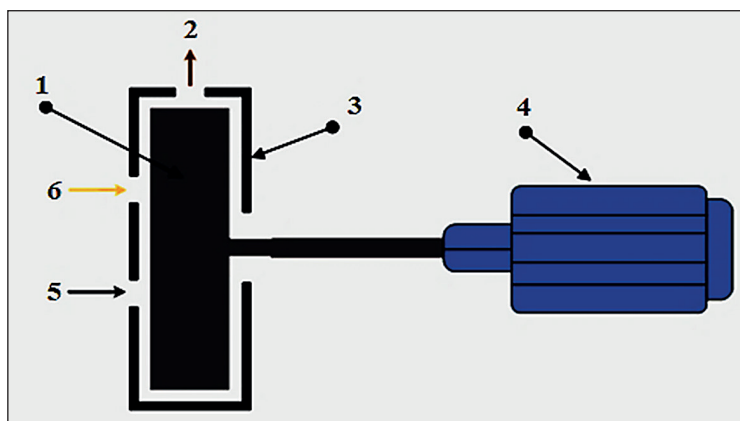


Рис. 1. Схема функционирования коллоидной мельницы в процессе изготовления водно-битумной эмульсии: 1 – ротор, 2 – эмульсия, 3 – статор, 4 – электро-мотор, 5 – битум, 6 – водный раствор эмульгатора

сточения требований, предъявляемых к цифровому управлению производством асфальтобетонных дорожно-строительных материалов [15].

Главная функция поверхностно-активных эмульгаторов заключается в уменьшении поверхностного натяжения водно-битумной эмульсии и предотвращении обратного слипания микрокапель. Следует отметить, что физико-химические характеристики эмульгаторов достаточно сильно влияют на свойства битумной эмульсии: вязкость, агрегатную устойчивость, способность к разрушению и адгезию. Битумные эмульгаторы подразделяются на анионные, катионные, неионные в зависимости от состава функциональной группы [16].

Наиболее распространенными в приготовлении водно-битумных дорожных эмульсий вначале были анионные эмульгаторы, но, начиная с середины XX века, в крупнотоннажном производстве более широко используются катионные эмульгаторы (3/4 объема битумных эмульсий составляет катионные) [17]. Дифильные молекулы эмульгаторов состоят из полярной (гидрофильная «головка») и гидрофобной (неполярный «хвост») частей; неполярная часть ориентирована к битумному компоненту, а гидрофильная часть – к водной фазе (рис. 2).

Синергетическое воздействие дифильных молекул эмульгатора объясняется тем, что, сосредотачиваясь на поверхности раздела двух жидких фаз, образующих микрогетерогенную водно-битумную эмульсию, они препятствуют обратному сливанию (коалесценцию) битумных микрокапель за счет двойного электрического слоя. Электростатическое отталкивание и наноструктурные характеристики двойного слоя оказывают сильное влияние на устойчивость и вязкость битумной эмульсии. В дорожном строительстве и реконструкции транспортных магистралей чаще применяются в синергетическом усилении универсальные эмульсии катионного вида. Катионные эмульгаторы – алкиламины с углеводородной цепью из 8–22 атомов (оптимальное число 12–14) углерода и первичных аминов ( $R-NH_2$ ), которые обеспечивают достаточно высокую адгезию битумного вяжущего к поверхности минеральных порошков и щебня кислой и основной природы.

Устойчивость технико-экономически эффективной водно-битумной эмульсии определяют по изменению однородности при хранении выдерживанием проб эмульсии в течение недели и месяца. Стабильность при транспортировке определяют после 2 часов встряхивания навески водно-битумной эмульсии,

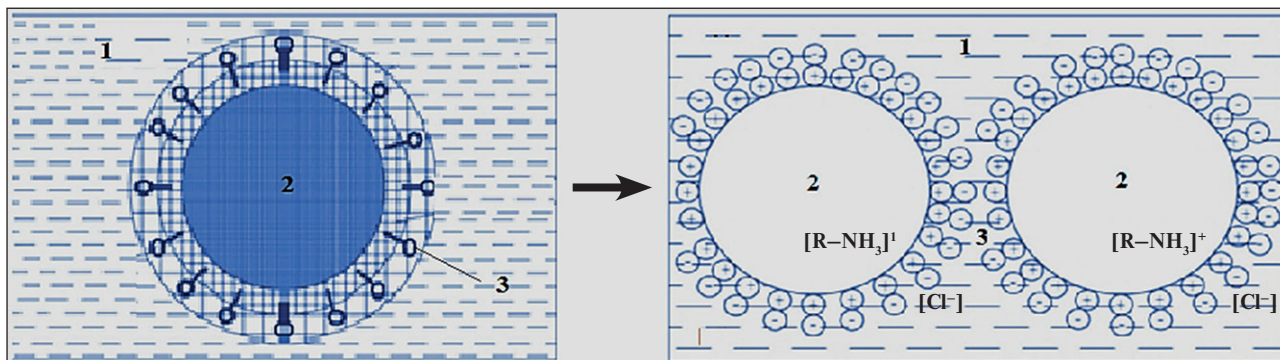


Рис. 2. Схема образования битумной эмульсии: 1 – слои водной фазы, примыкающие к гидрофильной части эмульгатора; 2 – битумная микрокапля, адсорбирующая гидрофобную часть эмульгатора; 3 – молекулы эмульгатора



при этом не должно происходить межфазного необратимого разделения на битум и воду. Нормативное технологическое определение свойств битумного компонента, выделенного из эмульсии, совершается после испарения воды; глубина проникания и величина растяжимости не должны уменьшаться более чем на 15 % показателей исходного битума.

Достаточно условная классификация битумных микродисперсных эмульсий осуществляется по типу эмульгаторов: анионные, катионные и др.; в зависимости от кинетической скорости распада при смешивании с минеральным порошком и щебнем: быстро-, средне-, медленнораспадающиеся; модифицированные (добавление комплементарных полимеров) немодифицированные и др. Например, марка ЭБПДК Б обозначает эмульсию битумно полимерную дорожную катионную быстрораспадающуюся.

Для технологичного приготовления дорожных эмульсий используют битумы нефтяные дорожные (БНД) марок БНД 200/300, БНД 90/130, БНД 60/90, БНД 40/60; соответствующую марку битума выбирают с учетом климатических условий района строительства и технологичной конструкции синергетического усиления дорожного покрытия. Например, для устройства автомагистралей в Республике Башкортостан, где зимой наблюдаются температуры ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , применяются битумы нефтяные дорожные БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300.

Для синергетического улучшения технологических характеристик водно-битумную эмульсию модифицируют полимерными нанодобавками (латекс, полиэтилен, эпоксидная смола, синтетический каучук, синтетическая смола и др.). Агрегативная модификация водно-битумной эмульсии макромолекулярными наноконпонентами осуществляется двумя способами: введением модифицирующей добавки в водную фазу эмульсии или непосредственно в эмульсию в процессе ее приготовления; эмульгированием модифицированного битума в полиминеральных дисперсиях [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Битумные дорожные эмульсии относятся к коллоидным эмульсиям, где микрогетерогенная битумная фаза распределена в водной дисперсионной среде в виде микрокапель с размером от 1 до 10 мкм (основную долю составляют битумные микрокапли диаметром 2–4,5 мкм). На рис. 3 представлена оптическая микрофотография (микроскоп Axio Scope A1) микроструктуры битумных эмульсий (количество битума дорожного БНД 70/100 составляет 61%, эмульгатора Синтерол — 1,8 %).

Водно-битумные эмульсии образуются в результате двух конкурирующих процессов: дробления (тон-

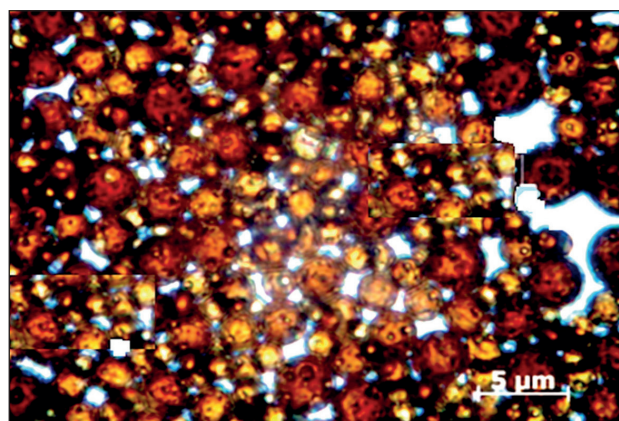


Рис. 3. Микрофотография водно-битумной эмульсии (увеличение в оптическом микроскопе  $\times 1000$ )

кого диспергирования) и коалесценции (слияния) микрокапель битумной дисперсной фазы. Адсорбция дифильных молекул эмульгаторов на поверхности раздела водно-битумных фаз и формирование двойного электрического слоя всегда протекает в течение определенного времени. Отметим, что кроме присутствия эмульгаторов, на устойчивость битумных эмульсий влияют: температура, минерализация и кислотность водной фазы, концентрация микрокапель дисперсной фазы и их размеры, броуновское хаотическое движение, плотность, вязкость и др.

Контролируемый распад водно-битумной эмульсии — кинетический процесс выделения битумного компонента из эмульсии после нанесения на поверхность дорожного покрытия автомагистралей или объединения битумной эмульсии и минерального материала — также корректно интерпретируется в рамках фрактального анализа. Синергетическая микроструктура асфальтобетонных покрытий, которая формируется комплементарным взаимодействием в приграничных слоях битумного вяжущего с поверхностью минерального компонента, определяется доминирующим взаимодействием взаимодополняемых факторов. В большинстве случаев каменные материалы: минеральные порошки и щебни — имеют отрицательные поверхностные заряды, а положительно заряженный эмульгатор притягивается электростатически к синергетическому заполнителю, вызывая контролируемый распад водно-битумной эмульсии (рис. 4). Синергетическое улучшение технологических характеристик дорожного асфальтобетона возникает в результате формирования непрерывных пленок адсорбированного битума.

Особенностью технологии устройства износостойких поверхностных обработок автомагистралей с использованием эмульсионно-минеральных смесей является необходимость нахождения оптимального диапазона времени контролируемого распада водно-



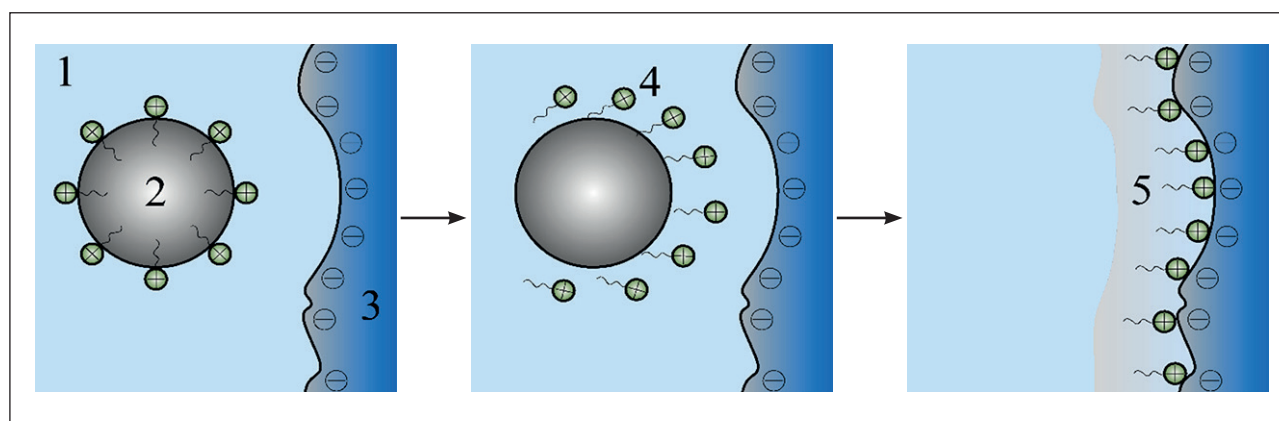


Рис. 4. Схема распада битумной микродисперсной эмульсии: 1 – водная фаза; 2 – битумная микрокапля; 3 – минеральный порошок; 4 – молекулы эмульгатора, 5 – пленка адсорбированного битума

битумной эмульсии в используемой композиции, т.е. времени от момента приготовления смеси до достижения твердофазного состояния. Контролируемая деградация эмульсии должна проходить после распределения синергетической эмульсионно-минеральной смеси по поверхности асфальтобетонного покрытия: при более быстром распаде преждевременно жидкофазный компонент загустеет в асфальтоукладчике и станет неудобоукладываемым, а при более медленном – жидкая битумная композиция стекает с поверхности дорожного покрытия.

Катионные битумные эмульсии по кинетической скорости распада при обработке минеральных взаимодополняемых материалов подразделяются на: быстрораспадающиеся водно-битумные эмульсии – деструкция в течение 5–15 минут, среднераспадающиеся – несколько часов – и медленнораспадающиеся – 1–2 суток [19]. Для определения кинетической скорости распада быстрораспадающихся водно-битумных микродисперсных эмульсий рекомендуется использовать кварцевый порошок с массовой долей менее 50%. Нормативная стабильность битумной дорожной эмульсии при транспортировании по технологическим характеристикам должна быть не менее 2 ч. При оптимальном составлении асфальтобетонных эмульсий необходимо учитывать стабильность при хранении; бимодальные эмульсии, хотя они имеют меньшую вязкость, чем мономодальные аналоги, обладают более высокой устойчивостью при хранении и транспортировании [20].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Дорожное покрытие транспортных автомагистралей воспринимает непосредственное воздействие физико-механической нагрузки, атмосферных факторов и обуславливает важнейшие эксплуатационные качества автодорог, при возведении которых

использовались синергетические битумные микродисперсные эмульсии. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий является достаточно существенной проблемой, так как связано с многообразием трудно поддающихся аналитическому математическому описанию факторов внешнего воздействия (наземного транспортного, погодных условий и др.), недостаточно полно изученными внутренними физико-химическими процессами структурирования в композиционном асфальтобетоне. Перспективным для интерпретации эволюции асфальтобетонного дорожного покрытия автомагистралей, konstruированных с использованием водно-битумных эмульсий, является синергетическая концепция [21].

Синергетическое усиление технологических характеристик асфальтобетонных покрытий, которое формируется взаимодействием в приграничных слоях битумного структурированного вяжущего с поверхностью минерального компонента, определяется доминирующим взаимодействием взаимодополняемых факторов. Фрактальные концепции долговременной прочности асфальтобетона дорожного покрытия автомагистралей отражаются в показателях степенной зависимости нелинейного деформирования под нагрузкой, характеризую энтропийную природу упругости и кинетику повреждаемости или скрытого разрушения микроструктуры от нагрузки. Долговременная прочность асфальтобетонного покрытия характеризуется энергией активации, определяющей термофлуктуационный разрыв битумных связей на наноуровне, а также фрактальной размерностью микроструктуры асфальтобетона, определяющей степенные закономерности при деформировании под нагрузкой [22]. Критерием оптимального выбора синергетической технологии устройства защитных износостойких слоев асфальтобетонных дорожных покрытий с применением водно-битумных



эмульсий является обеспечение безопасного движения наземного транспорта в течение нормативного срока эксплуатации [23, 24].

В 2020 году ежегодное мировое производство и использование битумных эмульсий в дорожном строительстве составляло более 7 млн тонн (США — 33% и Франция — 16%), в Российской Федерации произведено около 250 тысяч тонн. При выборе типа и марки водно-битумной эмульсии в процессе синергетического улучшения технологических характеристик дорожных покрытий главным образом следует принимать во внимание назначение микродисперсных эмульсий.

Основным преимуществом использования водно-битумных микродисперсных эмульсий по сравнению с традиционными (горячими, разжиженными) дорожными битумами является взаимодополняющее обеспечение [25]: достаточно полное сцепление отрицательно заряженной поверхности основания автодороги с положительно заряженной катионной эмульсией; технологичное производство битумных эмульсий позволяет варьировать качественный состав и требуемые характеристики; использование битумных эмульсий при температурах от 30°C до 70°C является более безопасным и уменьшает энергопотребление на 40–50%; допускается разлив битумных эмульсий на увлажненные поверхности с формированием прочной и водостойкой битумной пленки на комплементарной поверхности минеральных заполнителей. Кроме того, следует отметить технологическую экологичность многотоннажного приготовления и использования водно-битумной эмульсии: в атмосферу выделяется минимальный объем таких токсичных веществ, как горячий и разжиженный битум, производство становится также пожаро- и взрывобезопасным.

Дорожно-строительная отрасль Российской Федерации начала 21 века характеризуется масштабной трансформацией нормативных документов (ГОСТ 18689-81, 52128-2003, 58952.1-2020), регламентирующих требования к строительству и эксплуатации скоростных автомагистралей, которые, в основном, представлены отдельными участками федеральных трасс. Перевод в жидкотекучее состояние — эмульгирование водно-битумных вяжущих — при температуре окружающей среды требует стабильности при хранении и транспортировке. Одним из сдерживающих факторов для применения ресурсосберегающих нанотехнологий в России является отсутствие производства эффективных отечественных катионоактивных эмульгаторов и высокая стоимость импортных аналогов. Однако для производства эмульгатора предложено достаточно недорогое и доступное сырье: полиамидамы и продукты, содержащие жирные кислоты.

Для синергетического приготовления литых эмульсионно-минеральных смесей автодорожного назначения следует применять медленнораспадающиеся катионные битумные или битумно-полимерные эмульсии [26]. Комплементарное введение стирол-бутадиеновых латексов до 5% не оказывает существенного влияния на однородность и устойчивость водно-битумных эмульсий: наиболее эффективным является латекс СКС-65ГП, поскольку более 90% ультрадисперсных частиц имеют размер менее 100 нм [27]. Добавление стирол-бутадиеновых латексов оказывает позитивное синергетическое влияние на основные технологические характеристики водно-битумных композиций, что проявляется в существенном увеличении теплостойкости до 100°C, морозостойкости до –15°C, эластичности до 44%, температуры размягчения и твердости.

Водно-битумные эмульсии термодинамически неустойчивы — для них характерна фрактальная агрегация микрокапель дисперсной фазы и протекание процессов обратной седиментации, коалесценции. Отметим, что, в свою очередь, битумные вяжущие являются нефтяными нанодисперсиями, свойства которых определяются наночастицами дисперсной фазы и углеводородной дисперсионной средой [28]. Многотоннажные битумные дорожные микродисперсные эмульсии по ГОСТ Р 58952.1-2020 подразделяются на: эмульсии битумные анионные (ЭБА) и эмульсии битумные катионные (ЭБК).

На сегодняшний день предложены разнообразные способы использования водно-битумных эмульсий для производства дорожных работ в качестве структурированного комплементарного вяжущего; рекомендуемые области употребления марок битумных дорожных эмульсий приведены в табл. 1.

Из данных табл. видно, что наиболее часто водно-битумные микродисперсные дорожные эмульсии используются при синергетической подгрунтовке перед нанесением верхнего слоя асфальтобетона, ямочном ремонте и жидкофазной поверхностной обработке дорожных покрытий. Для комплементарного укрепления откосов грунтовых насыпей автодорог большой крутизны и из глинистых слабых грунтов рекомендуется использовать водно-битумные эмульсии ЭБА-3 с концентрацией битума 50–55%; при песчаных откосах битумная фаза составляет 40–50%.

Следует отметить, что по синергетической эффективности смешивания с различными минеральными заполнителями выделяют классы водно-битумных эмульсий: катионные (ЭБК-1, ЭБК-2 и ЭБК-3) и полимер-модифицированные эмульсии (ЭБПК-1, ЭБПК-2, ЭБПК-3); анионные (ЭБА-1, ЭБА-2 и ЭБА-3). Марки классов ЭБК-1 (ЭБПК-1), ЭБК-2 (ЭБПК-2), ЭБК-3 (ЭБПК-3) соответствуют быстрой, средней и медленной скорости распада при



Таблица 1

Технологически рекомендуемая область применения различных марок дорожных битумных микродисперсных эмульсий

Марка эмульсии	Сфера использования водно-битумных эмульсий
ЭБК-1 ЭБПК-1	Подгрунтовка (разлив жидкофазной битумной эмульсии) дорожных покрытий транспортных магистралей, устройство защитной поверхностной обработки.
ЭБК-2 ЭБПК-2	Технологичное устройство верхних слоев дорожных покрытий методом пропитки; оптимизированная технология приготовления черного щебня и пористых щебеночных смесей; ямочный ремонт выбоин автодорог.
ЭБК-3 ЭБПК-3	Устройство тонкослойных шероховатых слоев износа дорожных покрытий; технологичное изготовление плотных водно-битумных эмульсионно-минеральных смесей, в том числе грунтовых; укрепление откосов.
ЭБПА-1	Жидкофазная подгрунтовка; укрепление поверхности откосов земляного полотна; устройство износоустойчивой поверхностной обработки.
ЭБА-2 ЭБПА-2	Технологический уход за свежесложенным цементобетонным дорожным покрытием; приготовление черного щебня и щебенистых пористых смесей из карбонатных пород; устройство дорожных покрытий методом пропитки.
ЭБА-3 ЭБПА-3	Оптимизированное изготовление эмульсионно-минеральных смесей плотного состава обязательным введением 1–2% извести или 2–3% цемента; закрепление подвижных песков и слабых грунтов верхних слоев земляного полотна.

смешивании дорожных битумных микродисперсных эмульсий с минеральными комплементарными материалами различного гранулометрического состава.

Взаимодополняющие компоненты в составе водно-битумной эмульсии марок ЭБК выполняют синергетические функции: улучшение комплементарной адгезии; достижение нужной консистенции; улучшение технологических характеристик износостойкости, пластичности, морозоустойчивости путем супрамолекулярного улучшения полимерными нанокомпозитами [29] дорожного покрытия транспортной инфраструктуры. Независимо от скорости распада марки водно-битумных эмульсий они имеют примерно одинаковую концентрацию битума, вязкости, растяжимости, температуру размягчения. Технологические отличия проявляются в способности комплементарно смешиваться с частицами плотных (гравий, щебень) и пористых (керамзитовый гравий) минералов: марка водно-битумной эмульсии ЭБК-3 является универсальной для перемешивания, марка ЭБК-1 для этого малоприспособна, ЭБК-2 хорошо взаимодействует с пористым наполнителем.

Комплементарная особенность использования водно-битумной эмульсии марок ЭБК состоит в том, что после нанесения составляющие компоненты разделяются на два слоя: вода испаряется, а битумное вяжущее затвердевает, образуя прочную битумную пленку на синергетической поверхности минерального заполнителя с требуемыми эксплуатационными характеристиками [30]. Электрокинетическая скорость контролируемого распада обуславливает оптимальную сферу использования марки водно-битум-

ной эмульсии: ЭБК-1 используется для жидкофазной обработки поверхностного слоя дорожных защитных покрытий для улучшения сцепления; для грунтования слоев асфальтобетона, для улучшения сцепления между ними; для пропитки щебеночных слоев при укладке дорожного полотна, а также в процессе ремонта ям. Марка ЭБК-3 используется для создания защитного слоя дорожного покрытия с любым минеральным заполнителем, а ЭБК-2 применяется для технологичного конструирования оптимальной смеси с пористым минеральным наполнителем.

Минеральная часть эмульсионно-минеральных смесей, используемых для устройства поверхностных обработок, синергетически подбирается по технологическому принципу и состоит (для щебеночных смесей) из щебня фракции 5–10 или 5–15 мм (дробленых) или смеси природной фракции 2–5 мм и (дробленого) песков и минерального порошка. Оптимальное количество щебня и технологичное соотношение природного и дробленого песков в оптимизированных эмульсионно-минеральных смесях выбирается в зависимости от гранулометрических составов и требуемого коэффициента сцепления дорожного покрытия автомагистралей. Комплементарный минеральный порошок добавляют в эмульсионно-минеральную смесь в таком количестве, чтобы содержание частиц мельче 0,071 мм составляло 5–15%.

Кроме вышеуказанных минеральных материалов в литых эмульсионно-минеральных смесях могут быть синергетически использованы техногенные отходы: зола-шлак, известьсодержащие материалы и др. [31–33]. Рациональная замена высокопроч-



ных дорогостоящих каменных материалов местными грунтами, армированными укрепляющими вяжущими на основе отходов производства в конструктивных слоях покрытий для автодорог IV и V категорий, позволяет уменьшить не только стоимость дорожного строительства на 30–50%, но и техногенную нагрузку на окружающую экологическую среду регионов Российской Федерации.

В Башкортостане завод «Ремстройдормаш» (г. Уфа) производит водно-битумные эмульсии ЭБДК-Б (ЭБК-1), ЭБДК-Сэмульсия (ЭБК-2), ЭБДК-М (ЭБК-3) для ямочного ремонта, подгрунтовки и ресайклирования. Современное оборудование позволяет с использованием качественных синергетических ингредиентов производить до 10 тонн битумных микродисперсных эмульсий в час. Завод «Ремстройдормаш» разливает водно-битумную эмульсию в бочки по 200 литров для удовлетворения потребностей малых предприятий, которые занимаются ремонтом автодорог, парковок, придомовой территории на небольших площадях, где использование гудронатора экономически нецелесообразно. Отметим, что малые подрядные организации из соображений уменьшения стоимости дорожного строительства изготавливают эмульсии на своих участках, закупая дорожный битум на ближайших нефтеперерабатывающих заводах (в Уфе, в Салавате). В этом случае, конечно, трудно соблюдать нормативные технологические требования качественного синергетического приготовления водно-битумных эмульсий.

В рамках достижения технологического суверенитета Российской Федерации в качестве импортозамещающих катионных эмульгаторов рекомендуется использовать четвертичные соли аммония (например, алкилтриметиламмоний хлорид) в количестве 0,2–0,5% к массе воды. Имеются обнадеживающие результаты использования битумных микродисперсных эмульсий в технологии укрепления слабых грунтов дорожного полотна.

Наиболее производительной технологией синергетического укрепления грунтовых насыпей и реконструкции транспортных автомагистралей битумными микродисперсными эмульсиями является использование специализированных машин – ресайклеров. Более универсальными и технико-экономически выгодными ресайклерами являются дорожные машины с одним рабочим органом фрезерно-роторного типа, которые оснащаются датчиками скорости движения и дозированной системой подачи водно-битумной микродисперсной эмульсии (рис. 5).

Оптимальную поверхностную обработку из щебеночных эмульсионно-минеральных смесей рекомендуется устраивать для обеспечения требуемого коэффициента сцепления на аварийных частях автомобильных дорог, а из песчаных эмульсионно-

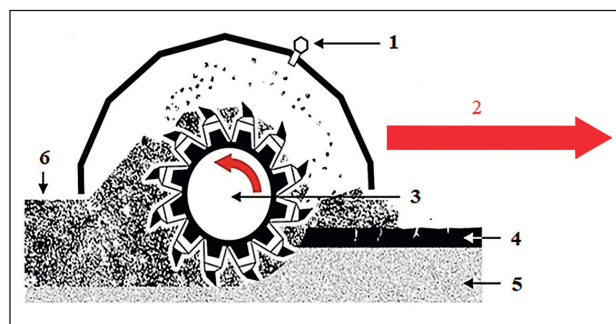


Рис. 5. Схема функционирования дорожного ресайклера: 1 – впрыскивание битумной эмульсии; 2 – направление движения; 3 – фрезерно-смешивающий барабан; 4 – разрушенный асфальтобетонный слой; 5 – дорожное полотно; 6 – ресайклированный слой автомагистрали

минеральных смесей – на участках транспортных автомагистралей с затрудненными условиями движения и в качестве защитного износостойкого слоя. Для синергетического устройства поверхностной обработки дорожных покрытий транспортной инфраструктуры следует применять эмульсионно-минеральные смеси литой консистенции, состоящие из минеральных материалов (щебня, песка, минерального порошка) и катионной водно-битумной микродисперсной эмульсии.

Следует также отметить, что дорожные покрытия в процессе технологической эксплуатации находятся под воздействием множества разнонаправленных факторов: грунтово-геологических и гидрологических условий, рельефа местности, погодных-климатических и физико-механических, обусловленных сверхнагрузками от большегрузного автотранспорта. Критические изменения водно-теплового режима дорожного полотна существенно влияют на прочность, синергетическую долговечность автодороги и приводят к уменьшению транспортно-эксплуатационных характеристик скоростных автомагистралей. На наноуровне асфальтобетонного покрытия порядка  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м происходит ускоренный процесс разрыва химических связей между атомами битумной вяжущей, что ведет к резкому ухудшению адгезионных и когезионных характеристик [34, 35]. Известные на сегодняшний день методы технологического мониторинга дорожных покрытий имеют определенные границы применимости, поэтому синергетический подход дополняет и объединяет комплементарные факторы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Асфальтобетонное дорожное покрытие является нелинейной системой, и изменение его эксплуата-



онных технологических характеристик сопровождается неаддитивными синергетическими эффектами. Синергетическое усиление технологических характеристик дорожных покрытий добавлением в состав битумных микродисперсных эмульсий обеспечивает альтернативный подход, при котором битум разжижается путем диспергирования в воде; является

оптимальным решением проблем интенсивного строительства и реконструкции автодорог России. Водно-битумные микродисперсные эмульсии с микрокаплями диаметром 2–4,5 мкм рекомендуются в востребованной технологии комплементарного укрепления слабых грунтов дорожного полотна скоростных автомагистралей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карпенко Ф. В., Гуреев А. А. Битумные эмульсии. Основы физико-химической технологии производства и применения. М.: 1998. 194 с.
2. Абдуллин А.И., Идрисов М.Р. Битумные эмульсии в дорожном строительстве // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 23. С. 124–128.
3. Евдокимова Н.Г., Лунова Н.Н., Егорова Н.А., Махмутова А.Р., Байгузина Ю.А., Имангулова Э.А. К выбору технологии производства полимерно-битумных вяжущих как инновационных наносвязующих для устройства асфальтобетонных покрытий // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10, № 5. С. 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>
4. Земляков А.Ю., Лобанков Е.В., Ромаденкина С.Б. Разработка составов битумных эмульсий для дорожного строительства // Башкирский химический журнал. 2019. Т. 26, № 3. С. 52–57. <https://doi.org/10.17122/bcj-2019-3-52-57>
5. Будник В.А., Евдокимова Н.Г., Пушкарева Т.В. Процессы эмульгирования битума в воде и способы их совершенствования // Нефтегазовое дело. 2008. № 1. С. 32.
6. Опасенко О.Н., Крутько Н.П. Свойства и применение битумных дисперсий и битумно-эмульсионных материалов. Минск: Белорусская наука, 2014. 270 с.
7. Тюкилина П.М., Гуреев А.А., Тыщенко В.А. Производство нефтяных дорожных вяжущих. М.: Недра, 2021. 303 с.
8. Абдуллин А.И., Дьяконов Г.С., Идрисов М.Р., Абдуллин И.А., Гатиятуллин М.Х. Битумная эмульсия для дорожных покрытий // Патент 2505570 РФ. Опубл. 27.01.2014.
9. Полежаева Н.И. Физикохимия нефтяных дисперсных систем. Нефтяные дисперсные структуры. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. 94 с.
10. Глазачев А.О., Иванова О.В., Сеницин Д.А., Ахметшин Р.М. Комплементарное улучшение макромолекулярными нанокompозитами технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 453–464. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-453-464>
11. Халиков Р.М., Иванова О.В., Павлов С.Ю., Глазачев А.О. Инновационные тенденции эффективного приготовления битумных эмульсий при строительстве автомобильных дорог // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 112–6. С. 139–142.
12. Gingras J.-P., Tanguy P.A., Mariotti S., Chaverot, P. Effect of process parameters on bitumen emulsions. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005; 44(9): 979–986. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.01.003>
13. Евдокимова Н.Г., Егорова Н.А., Султанова Д.П., Кунакулова Э.М., Сережкина Н.Г. Формирование золь-гелевой наноструктуры дорожных битумов методом подбора группового химического состава // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11, № 5. С. 512–525. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-512-525>
14. Xu L., Hou X., Li X., Xiao F. Impact of constituent migration on colloid structure and rheological characteristics of emulsified asphalt with self-crosslinking modifiers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021; 619: 126530. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126530>
15. Пудовкин А.Н., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Соколова В.В., Недосеко И.В. Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 3–4. С. 103–113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113>
16. Ayar P. Effects of additives on the mechanical performance in recycled mixtures with bitumen emulsion: An overview. Construction and Building Materials. 2018; 178:551–561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.174>
17. Игнатьев А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. №1(63). С. 14–30. [https://doi.org/10.52409/20731523\\_2023\\_1\\_14](https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14)
18. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Черкашина Н.И., Кожанова Е.П., Старченко С.А. Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>
19. Усов Б.А., Горбунова Т.Н. Свойства и модификация битумных вяжущих // Системные технологии. 2017. № 1(22). С. 72–88.
20. Querol N., Barreneche C., Cabeza LF Storage stability of bimodal emulsions vs. monomodal emulsions. Applied Sciences. 2017; 7(12): 1267. <https://doi.org/10.3390/app7121267>
21. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Синергетический подход к моделированию физического износа инженерно-технических систем // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 93–102.



22. Кирюхин Г.Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона // Дороги и мосты. 2014. № 1(31). С. 247–268.
23. Халиков Р.М., Павлов С.Ю., Глазачев А.О. Качественное улучшение технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог взаимодополняющими инновационными добавками // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 103–7. С. 119–122. <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2023-425>
24. Глазачев А.О., Павлов С.Ю., Иванова О.В., Халиков Р.М. Синергетические технологии конструирования износостойких слоев асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 106-9. С. 22–25. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2024-481>
25. Бикмухаметова Г.К., Емельянычева Е.А., Абдуллин А.И., Сибгатуллина Р.И. Битумные материалы в дорожном строительстве. Применение водо-битумных эмульсий // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 20. С. 128–131
26. Коротков А.В., Котлярский Э.В., Гридчин А.М. Требования к битумным эмульсиям для приготовления литых эмульсионно-минеральных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 10–12.
27. Мурафа А.В., Макаров Д.Б., Нуриев М.А., Хозин В.Г. Наномодифицированные битумные эмульсии строительного назначения // Известия КГАСУ. 2010. №2(14). С. 245–249.
28. Евдокимова Н.Г., Лунева Н.Н., Егорова Н.А., Махмутова А.Р., Байгузина Ю.А., Имангулова Э.А. К выбору технологии производства полимерно-битумных вяжущих как инновационных наносвязующих для устройства асфальтобетонных покрытий // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10, № 5. С. 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>
29. Халиков Р.М., Иванова О.В., Глазачев А.О. Супрамолекулярное улучшение полимерными нанокомпозитами технологических параметров асфальтобетонных дорожных покрытий // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: Материалы Международ. конф. Уфа: УГНТУ, 2022. С. 432–436.
30. Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И., Цвирко М.В. Укрепление дорожных грунтов битумной эмульсией // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2 (210). С. 168–173.
31. Грицук А.И., Туманова С.А., Чаргазия Т.З., Бородай Д.И., Стукалов А.А. Эффективность использования золошлаков в дорожном строительстве // Экономика строительства и городского хозяйства. 2017. Т. 13, № 1. С. 81–91.
32. Khalikov RM, Pavlov SY, Glazachev A. O., Akhmetshin RM Supramolecular mechanism for strengthening clay foundations of highways with complementary nanoadditives. Trends development sciences and education. 2024; 107-9: 83-85.
33. Степанов С.В., Петропавловских О.К., Копылов М.А. Применение отходов металлургической промышленности в транспортном строительстве // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 2 (6). С. 29–36.
34. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Интерпретация свойств асфальтобетона в дорожном покрытии // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 87–92.
35. Смирнов В.А., Королев Е.В., Данилов А.М., Круглова А.Н. Фрактальный анализ микроструктуры наномодифицированного композита // Нанотехнологии в строительстве. 2011. Т. 3, № 5. С. 78–86.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Глазачев Антон Олегович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [anton.glazachev@mail.ru](mailto:anton.glazachev@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-4036-3155>

**Иванова Ольга Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [olgachemist@mail.ru](mailto:olgachemist@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6678-8369>

**Павлов Станислав Юрьевич** – кандидат юридических наук, доцент кафедры «Финансового и административного права», Институт права, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, [sta227@yandex.ru](mailto:sta227@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4201-7401>

**Салов Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [salov@list.ru](mailto:salov@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7003-3022>

**Ахметшин Ранис Мидхатович** – старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [ranisahmetshin@mail.ru](mailto:ranisahmetshin@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-3269-3596>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Глазачев А.О.** – научное руководство, обработка результатов.

**Иванова О.В.** – концептуальное редактирование, написание и перевод текста.

**Павлов С.Ю.** – сбор и аналитическая обработка нормативных документов.

**Салов А.С.** – разработка методологии, научное редактирование текста.

**Ахметшин Р.М.** – графическое представление результатов исследования.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.09.2024; одобрена после рецензирования 02.10.2024; принята к публикации 08.10.2024.



# Comprehensive assessment of the geological heterogeneity of reservoir systems in the process of regulating the development of oil fields

Yuri A. Kotenev , Shamil Kh. Sultanov , Alexander V. Chibisov , Viktor M. Chilikin\* 

World-class scientific center "Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet", Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

\* Corresponding author: e-mail: [cleanlist867@mail.ru](mailto:cleanlist867@mail.ru)

## ABSTRACT

**Introduction.** Today, a detailed study of the geological structure of oil and gas fields is essential. The study and understanding of the geological structure can be achieved through the analysis of geological heterogeneity. This has a significant impact on the degree of involvement of the reservoir volume in the drainage process, determines the dominant directions of filtration flows and the nature of oil displacement in the process of formation flooding. **Methods and materials.** The paper presents statistical indicators of the main reservoir characteristics – porosity, permeability, dissection, sandiness, as well as complex indicators of macro- and microheterogeneity in permeability distribution. The given characteristics allow estimating the variability of the reservoir, both by area and by section, i.e. in the volume of the oil-and-gas bearing reservoir. **Results.** This paper highlights the results of a comprehensive analysis of the micro- and macroheterogeneity of the studied object and a comparison of the identified zones with production data on well operation. The purpose of the study is to develop, using the example of studying the UV<sub>1</sub> formation, an algorithm for selecting geological and technological measures, including the use of horizontal well drilling with aphron-containing drilling muds, based on identifying geological and industrial causes of premature water cut in the extracted products, and determining the geological factors that control the distribution of residual hydrocarbon reserves. Determining the causes of premature water cut will help not only to eliminate premature water cut, but also to carry out work to prevent it. **Conclusion.** The established causes of premature well water cuttings as a result of the analysis will allow to determine promising areas for optimizing the development system – revision of the well grid, drilling of new horizontal production and injection wells, changing operating modes, using flow-diverting technologies, etc. Establishing the directions of fluid movement using heterogeneity analysis helps to determine the sources of water that prematurely enters the well (bottom or injected waters).

**KEY WORDS:** geological heterogeneity, formation UV<sub>1</sub>, water cut, statistical analysis, aphron-containing drilling muds

**ACKNOWLEDGMENTS:** The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-15-2022-297 within the framework of the program for the creation and development of the World-Class Research Center "Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet".

## FOR CITATION:

Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Chibisov A.V., Chilikin V.M. Comprehensive assessment of the geological heterogeneity of reservoir systems in the process of regulating the development of oil fields. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(5): 473–484. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-473-484>. – EDN: NRIKVL.

## INTRODUCTION

At the current stage of development of the oil and gas industry, the problem of uneven development of oil reserves remains relevant. One of the main influencing factor is the geological structure of the reservoir. Studying the geological heterogeneity of the reservoir allows to

qualitatively and quantitatively assess the structure of the reservoir. This term refers to the variability of petrophysical properties and the forms of occurrence of a reservoir within a horizon or production facility, which affects the nature of the movement of liquids and gas during production and the distribution of hydrocarbon reserves in the volume of the productive formation UV [1].



The main objective of the research is to obtain a complete picture of the geological heterogeneity of the UV1 formation to determine the degree of its influence on the process of reserves development. This objective determines the fulfillment of the following tasks: study of micro- and macroheterogeneity using statistical methods; analysis of geological and industrial information; identification of geological factors that have the greatest influence on the unevenness of the frontal advance of injected water and the reasons for the different rates of production of hydrocarbon reserves.

## METHODS AND MATERIALS

Many scientists study geological heterogeneity by dividing it into several levels – micro- and macroheterogeneity [2–5]. Microheterogeneity is understood as the reservoir properties, and macroheterogeneity is understood as the variability of the spatial distribution of the reservoir within the deposit or production facility [3, 5]. These parameters are quantitatively assessed using the coefficients of porosity, permeability (microheterogeneity), dissection, sandiness, reservoir distribution, etc. (macroheterogeneity).

The assessment of geological heterogeneity is performed by applying statistical tools, typically using descriptive statistics.

Descriptive statistics is the collection and processing, i.e. systematization of an array of data, usually quantitative, carried out with the aim of converting it into a practical form for analysis [6]. The main goal of this technique is to present processed data in the form of histograms, crossplots, graphs and tables, as well as their description using the main statistical indicators (Min, Max,  $\sigma$ , etc.)

[7]. Accordingly, there are three types of presentation of systematized data: 1) in the form of graphic materials – graphs, diagrams, histograms, maps, 3D cubes, etc.; 2) in the form of tables, ordered and grouped data; 3) in the form of indicators describing statistics.

Statistical indicators are divided into two groups [7]: 1) indicators characterizing the center of data grouping ( $\bar{x}_{arith}$ , Me, Mo, etc.); 2) indicators characterizing the dispersion of data ( $D$ ,  $\sigma$ ,  $R$ , etc.).

## RESULTS

The researchable object consists of two deposits of the layer-arch type, the reservoir of terrigenous composition is represented by sandy-silty-clayey material, the caprock is represented by claystones of the togura.

The sediments were formed in a marine environment, namely in a coastal-marine complex in a coastal-marine plain environment, but with a rather dissected relief of the sedimentation environment surface. On the elevated parts of the paleorelief, elongated bar bodies were deposited, mainly of northwestern strike (Fig. 1), with an increased amount of sandy material. In the lower parts of the paleorelief, uneven alternation of clay and sand interlayers is noted, which is typical for deposits of buffer zones between bar bodies, with a frequently changing hydrodynamic sedimentation regime (sub-environment of tidal currents and storm waves) [8, 9, 10]. The sedimentation environment has the greatest influence on the distribution of filtration-capacitive properties [11–14].

According to the statistical analysis, the porosity coefficient within the studied object varies from 0.108 to 0.256 units. The average porosity value for the UV1 formation for the considered deposit is 0.158 units.

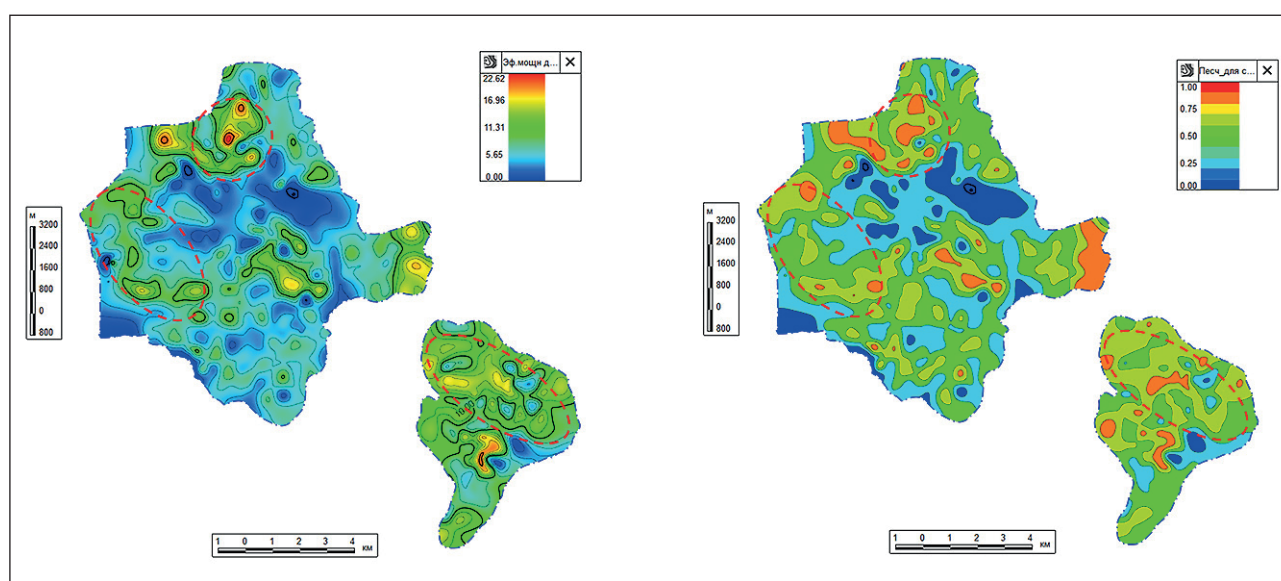


Fig. 1. Maps of effective thickness and sandiness of the UV1 formation. Source Compiled by the authors



According to the histogram analysis, the distribution of the porosity coefficient is close to normal (i.e. the median, mode and average values are almost equal to each other), the highest frequency of opening (11.35%) belongs to the interval [0.152;0.160] (Fig. 2). Also, a high frequency of opening (10.85 and 10.36%) is characteristic of the intervals [0.160;0.167] and [0.145;0.152], respectively. In plan, the porosity within a separate deposit is distributed relatively uniformly (Fig. 3). The average porosity of the eastern deposit is 0.169 f.u., and of the western one 0.155 f.u.

To study the distribution of the porosity coefficient in the section, the geological-statistical section (GSS) was analyzed; to increase clarity, the data were divided into 4 conditional classes with an equal step (0.037 f.u.) – 0.108–0.145, 0.145–0.182, 0.182–0.219, 0.219–0.256 f.u. (Fig. 4). High values of the porosity coefficient ( $> 0.182$  f.u.) are distributed relatively evenly throughout the entire thickness of the UV1 formation. The frequency of occurrence of low values of  $K_p$  (from 0.108 to 0.145 f.u.) changes as follows: 13% in the upper part of the formation (layers 1–19), 35% in the middle part of the formation (layers 20–38), 45% in the lower part of the formation

(layers 39–57). The average value of the porosity coefficient along the section is shown in Figure 5.

The second parameter analyzed by the authors, which allows to estimate the microheterogeneity of the formation, is the permeability coefficient. The distribution of this parameter is lognormal (i.e. the logarithm of a random variable has a normal distribution) (Fig. 6), the minimum values are  $0.12 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , the maximum are  $300 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$  ( $R = 299.88 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), the average value is  $18.86 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , the median is  $5.02 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . The highest frequency of opening – 8.1% belongs to the interval from  $4.1 \cdot 10^{-3}$  to  $6.04 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

The distribution of the permeability coefficient is relatively uniform over the area, with the exception of local increases in permeability, possibly associated with the presence of conductive faults in these areas (Fig. 7). In addition, the heterogeneity in permeability was calculated to assess it across the section:

$$K_{\text{heter.perm.}} = K_{\text{perm.max.}} / K_{\text{perm.av.}}, \quad (1)$$

where,  $K_{\text{perm.max.}}$  is the maximum value of the permeability coefficient in a well, and  $K_{\text{perm.av.}}$  is the weighted

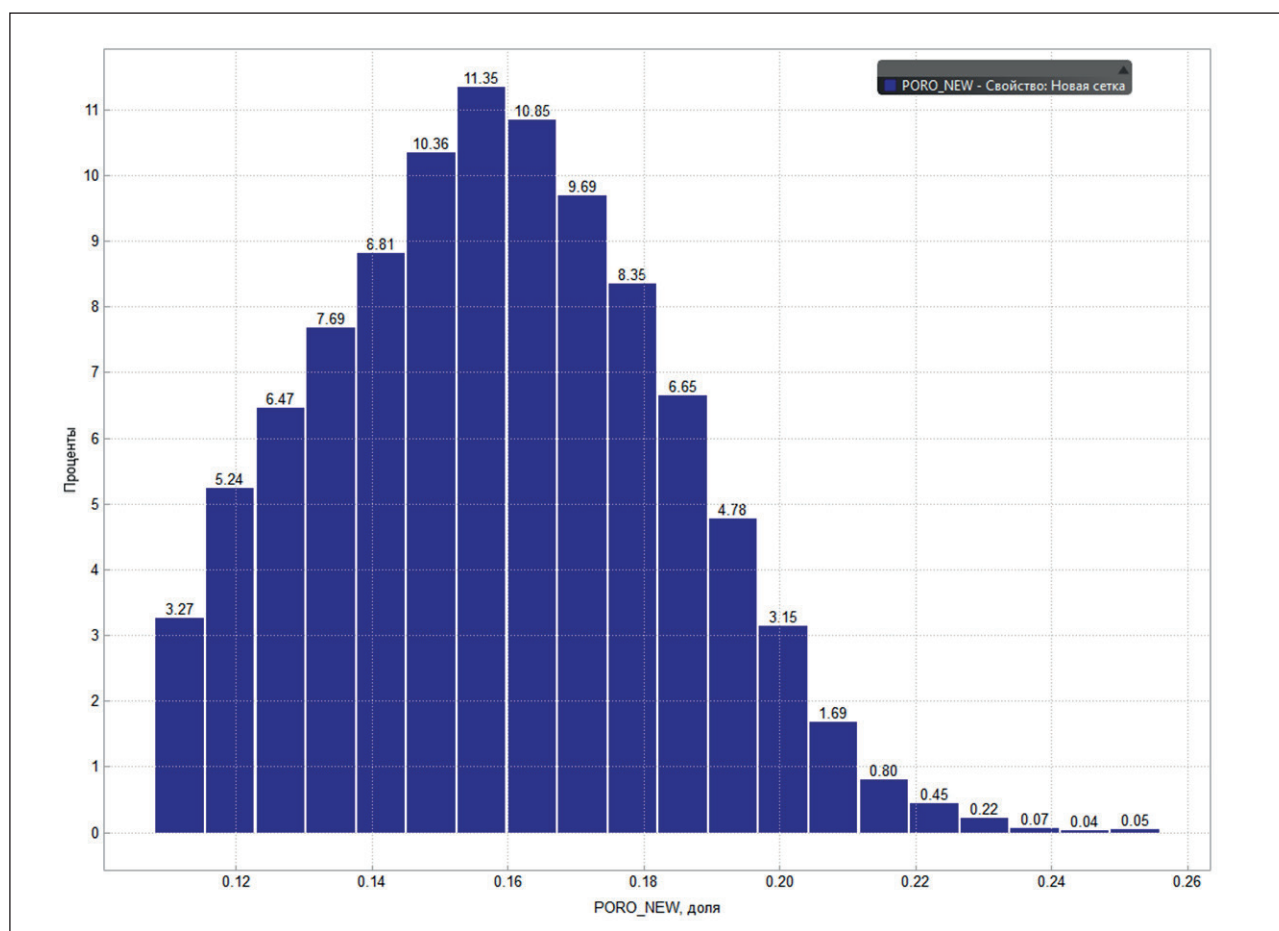


Fig. 2. Histogram of the porosity coefficient of the UV1 formation. Source Compiled by the authors



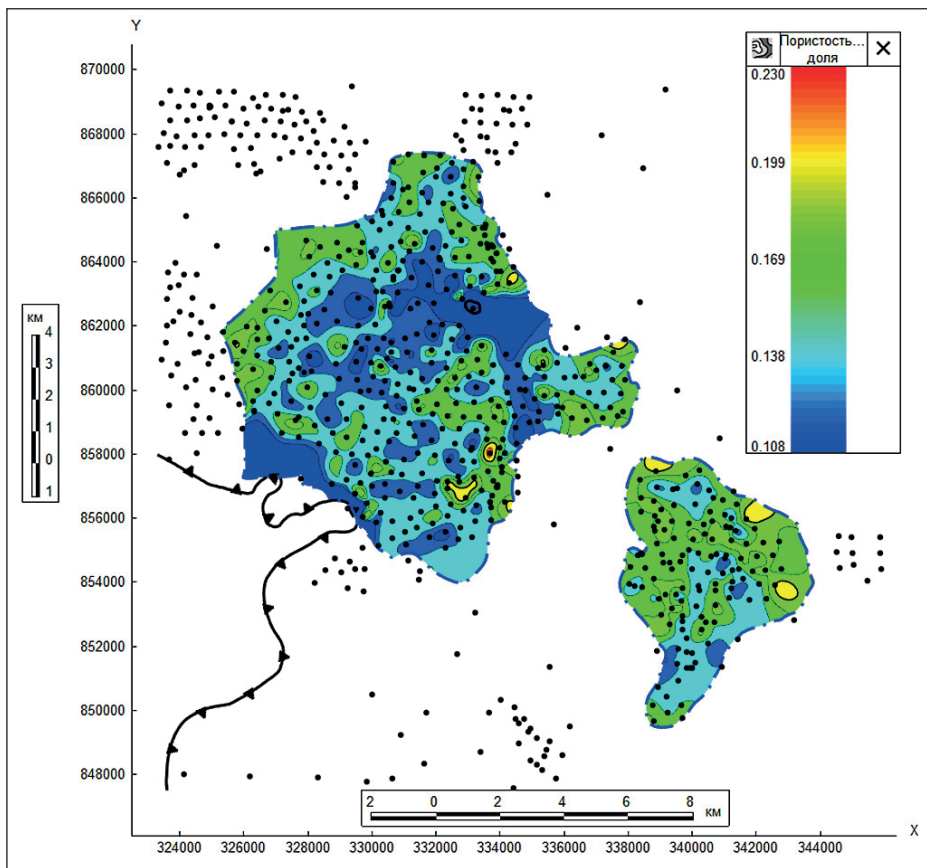


Fig. 3. Map of the porosity coefficient of the UV1 formation. Source Compiled by the authors

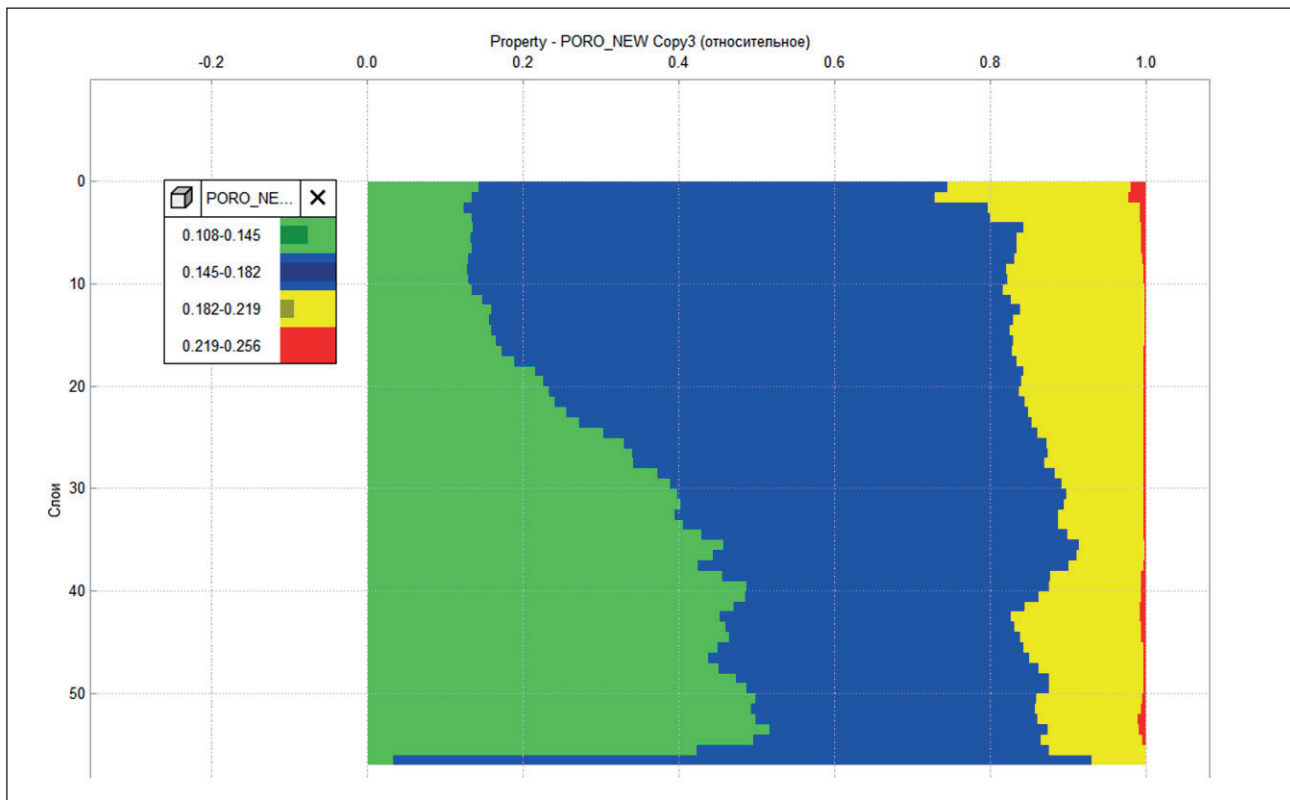


Fig. 4. GSS of the porosity coefficient of the UV1 formation. Source Compiled by the authors



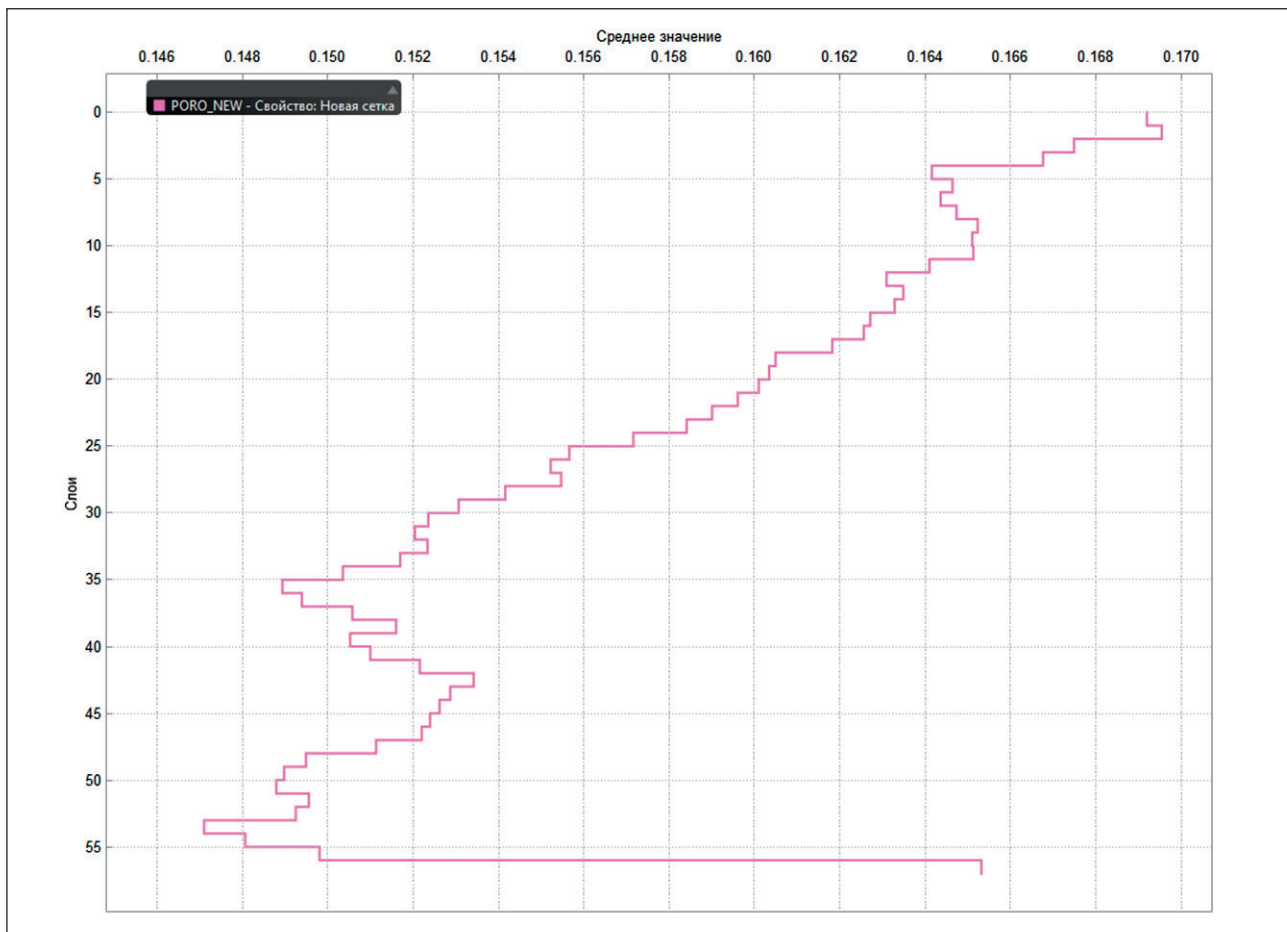


Fig. 5. Average value of the porosity coefficient along the section of the UV1 formation. Source Compiled by the authors

average value of the permeability coefficient in the same well.

Areas where this indicator numerically exceeds the value of 5 are considered highly heterogeneous in permeability in the section. It is also worth noting that permeability follows the trend of porosity by decreasing the average value from the roof of the reservoir bed to its base (Fig. 8).

A similar analysis using descriptive statistics was carried out to assess macroheterogeneity. The coefficient of dissection varies from 0 to 10.4 units, the average value for the UV1 formation is 4 units. High values of this indicator (from 7 to 10 units) are concentrated in the buffer zones of sand bars, i.e. in those places of paleo-relief where, according to the conditions of formation, frequent changes in the hydrodynamic regime occurred, as a result of which sandy and clayey material alternately accumulated.

The sandiness coefficient varies from 0 to 1 f.u., the average value is 0.5 f.u. (Fig. 1). In plan, this indicator is distributed relatively evenly, increased values (0.65–1 f.u.) are found in bar bodies of northwestern distribution. The eastern deposit, compared to the western one, is distin-

guished by a higher sandiness on average – 0.48 and 0.58 f.u., respectively. The distribution of the reservoir along the section coincides with the typical section of coastal-marine deposits (Fig. 9).

In addition to these studies, the authors estimated a complex macroheterogeneity index characterizing the dissection of the studied object per unit of reservoir rock thickness. On average, for the UV1 formation, the mentioned index is 0.61 units/m. For bar deposits, it is equal to relatively low values, which indicates higher thicknesses of sand interlayers in these areas.

Based on the implemented maps, histograms and GSS, the authors identified 4 areas of increased geological heterogeneity (Fig. 10 and Table 1).

*1 area* is characterized by high heterogeneity of permeability in the section and plan ( $0.15 \cdot 10^{-3}$  to  $122 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), the average value of the porosity coefficient is 0.15 f.units, in the southern part of this area values up to 0.11 f.units are observed, the dissection corresponds to the average for the formation – 4 units, the sandiness coefficient is higher than the average for the formation and is 0.53 f.units, the complex indicator of macroheterogeneity is 0.65 units/m.



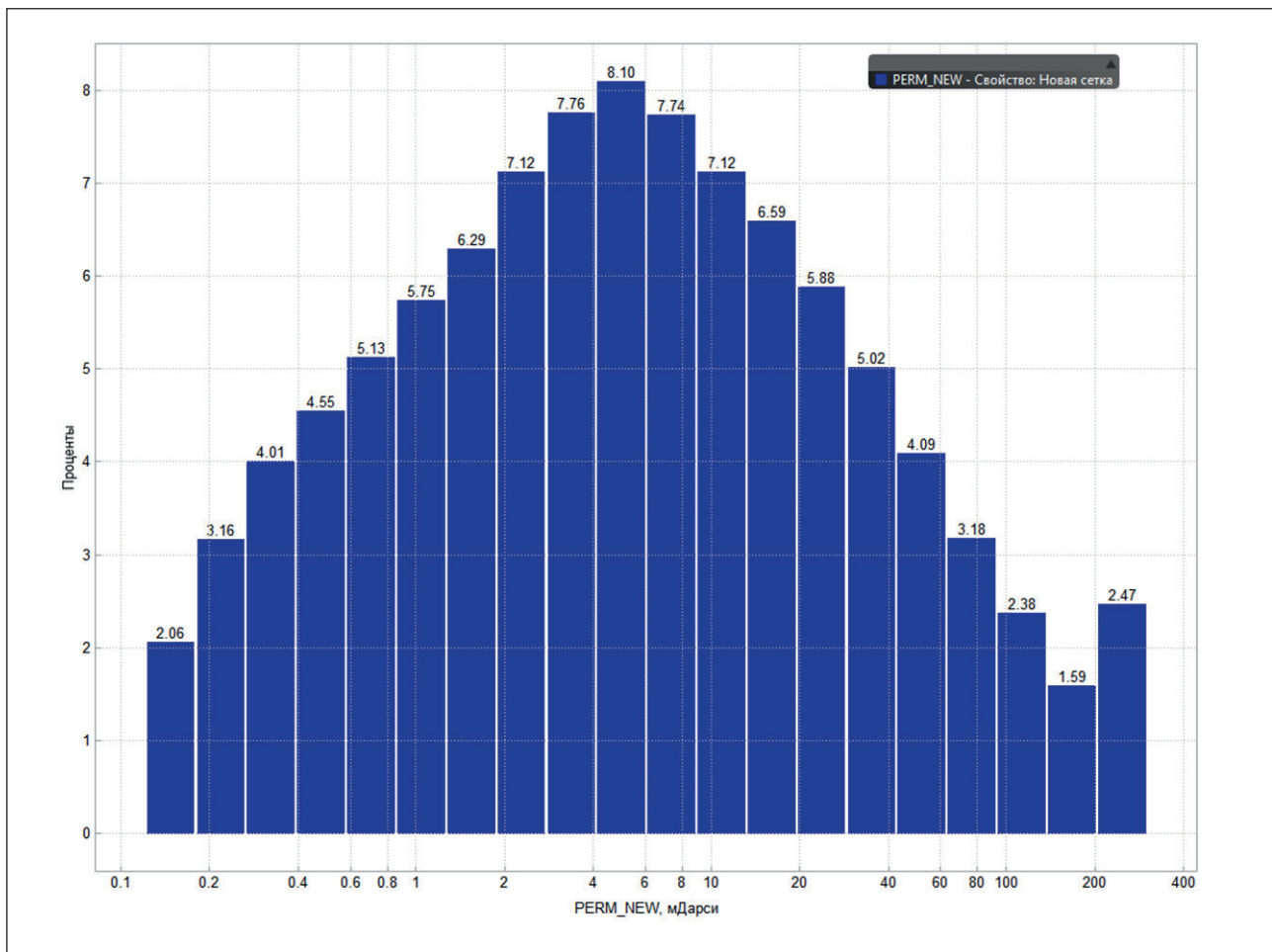


Fig. 6. Histogram of the permeability coefficient of the UV1 formation. Source Compiled by the authors

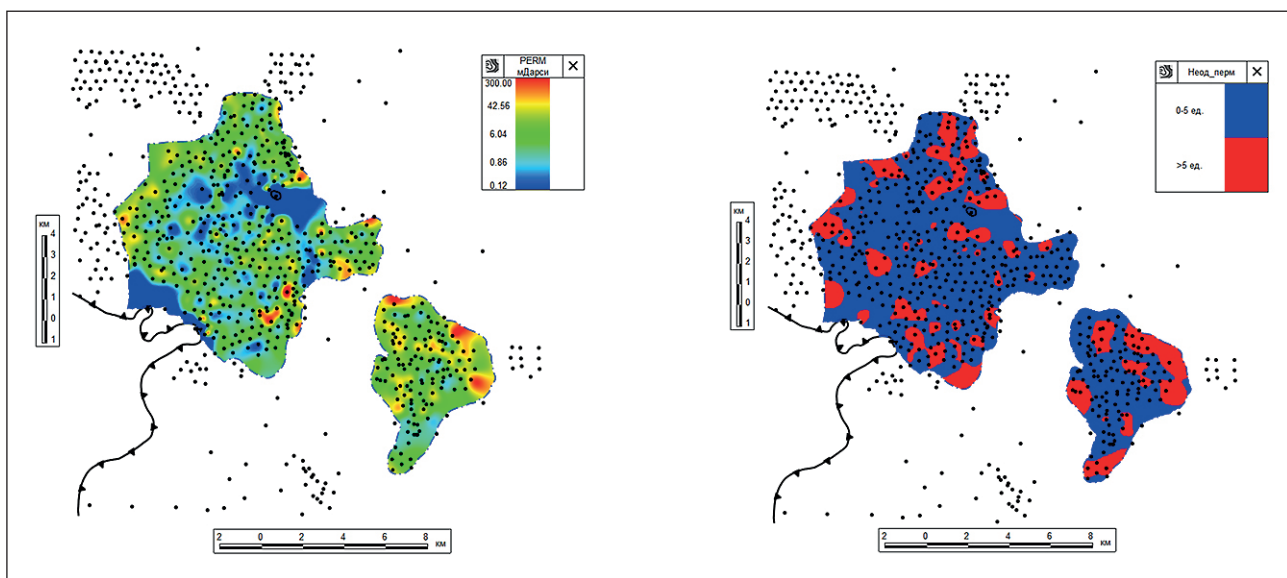


Fig. 7. Map of permeability coefficient and permeability heterogeneity in the section of the UV1 formation. Source Compiled by the authors



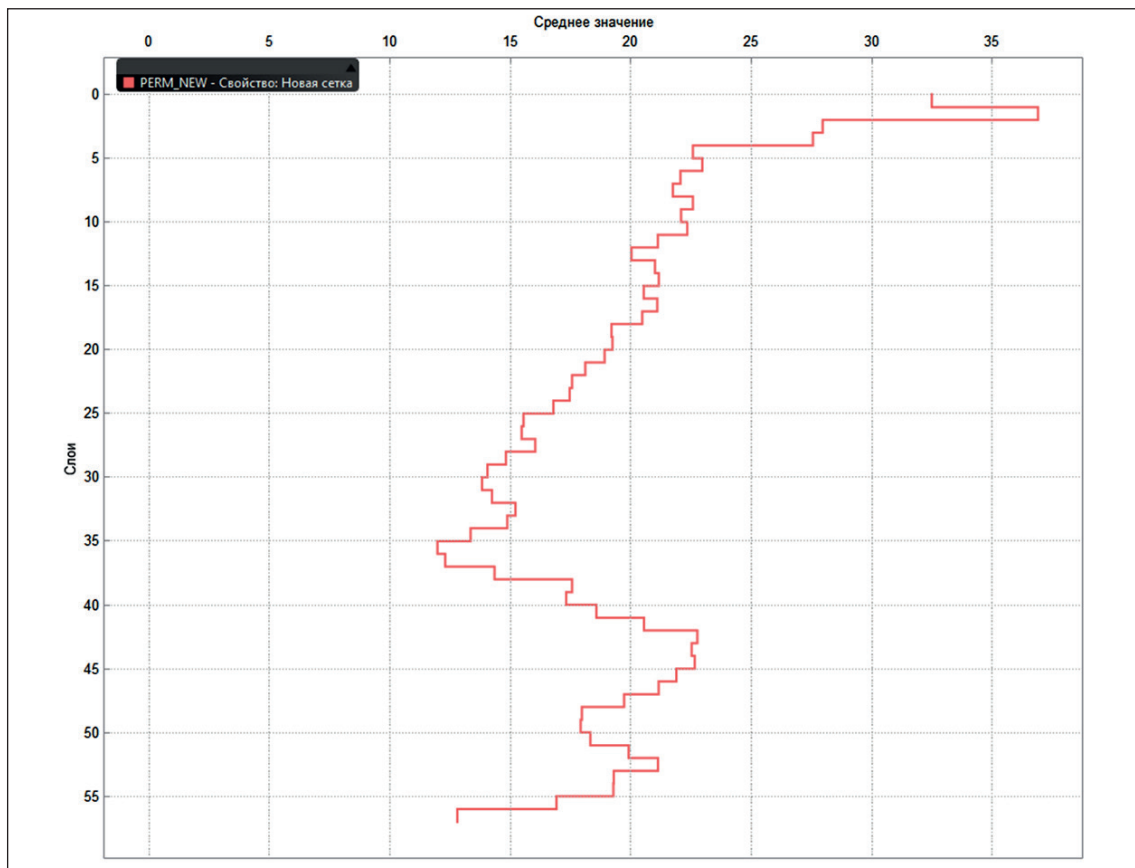


Fig. 8. Median distribution of permeability coefficient along the section of the UV1 formation. *Source* Compiled by the authors

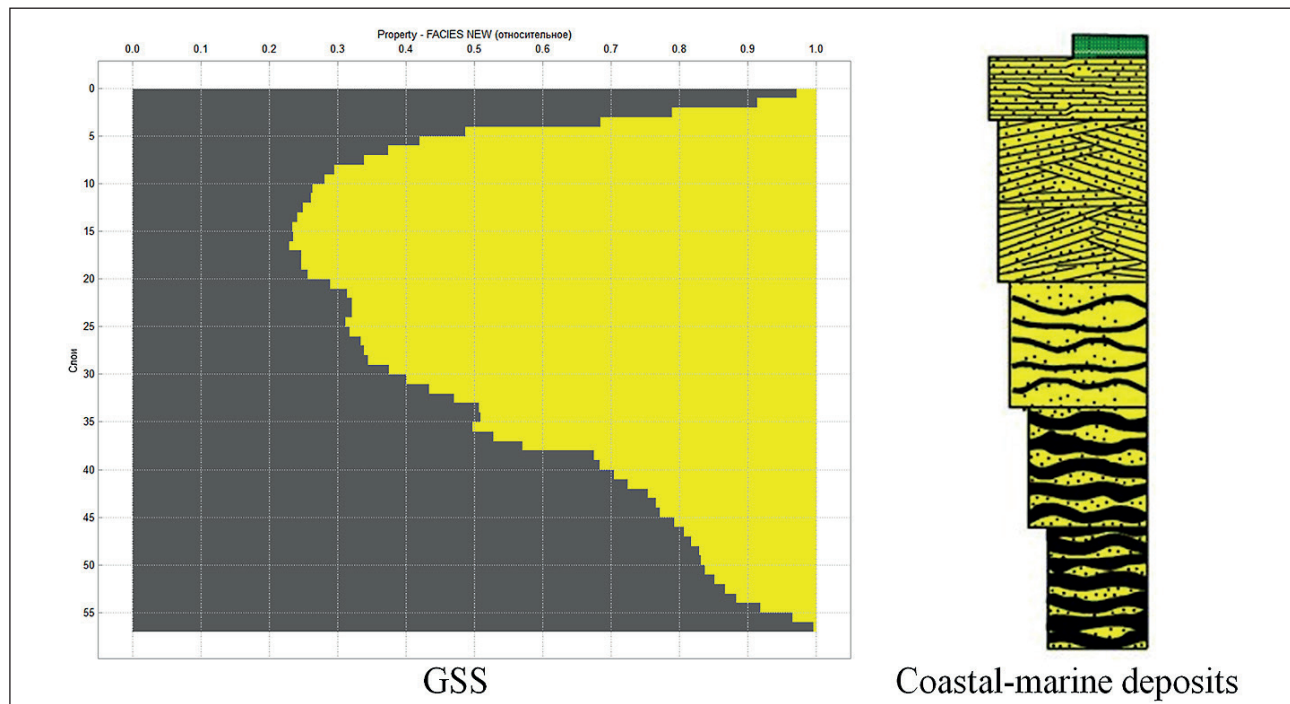


Fig. 9. GSS for the lithology cube for the UV1 formation. *Source* The GSS was compiled by the authors, diagram [6]



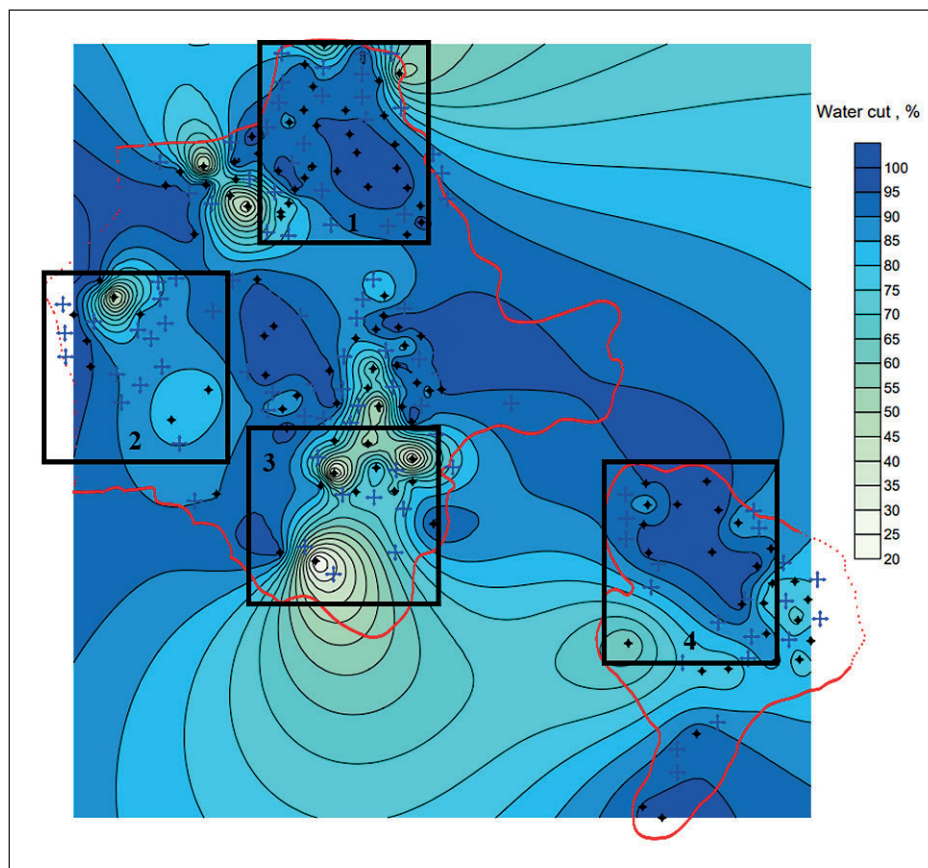


Fig. 10. Map of current water cut of the UV1 formation. Source Compiled by the authors

Table 1  
Geological and physical characteristics of the UV1 formation

Research object	Microheterogeneity		Macroheterogeneity			
	Coeff. por., f.u.	Coeff. perm., $10^{-3} \mu\text{m}^2$	Coeff. dissec., units	Coeff. sand, f.u.	Comp. Coeff. of macroheter., units/m	Collector distribution coeff., f.u.
UV1	$\frac{0,16}{0,11 - 0,26}$	$\frac{12,7}{0,12 - 300}$	$\frac{4}{0 - 10,4}$	$\frac{0,50}{0,00 - 1,00}$	$\frac{0,61}{0,00 - 2,43}$	0,99
1 area	0,15	7,3	4	0,53	0,65	1
2 area	0,15	8,1	4,4	0,49	0,70	1
3 area	0,15	12,9	3,4	0,46	0,65	1
4 area	0,17	23,5	4,5	0,64	0,40	1

Source Compiled by the authors.

2 area is characterized by high dissection (average value 4.4 units), especially in the northern part (up to 10 units), permeability is especially unevenly distributed in the section, the average value of the porosity coefficient is 0.15 units, sandiness is almost equal to the average for the formation, lower values are located in the eastern part of this area, the complex indicator of macroheterogeneity is 0.7 units/m, which indicates a relatively reduced thickness of the reservoir layers.

3 area has on average a fairly high permeability, in plan its distribution is fairly uniform, however there is a very strong scatter in the section, the porosity coefficient is equal to 0.15 f.u., the dissection is quite low and in the northern part is equal to 1 unit, the sand content is below the average for the formation and is 0.46 f.u., the complex indicator of macroheterogeneity is equal to 0.65 units/m.

4 area as a whole is distinguished by increased characteristics relative to the average for the formation, especially



in permeability —  $12.7 \cdot 10^{-3}$  and  $23.5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , respectively, this area is also characterized by high variability of permeability along the section, the average value of the porosity coefficient is 0.17 f.units, the dissection is 4.5 units, in the center of the area low values are observed (up to 1 unit) to the periphery they increase (up to 8.5 units), the sandiness coefficient is 0.64 f.units, the complex coefficient of macroheterogeneity is 0.4 units/m, which indicates an increased thickness of permeable layers.

At the next stage, the results of the comprehensive assessment of geological heterogeneity were compared with the field data of well operation.

The formation of the WIS at the UV1 site has been carried out since 1999. At the main deposit, an inverted seven-point system in combination with a focal system has been implemented, and at the Eastern deposit, a selective system.

As of 01.01.2024, there are 342 wells at the facility. The active production stock is 125 wells. All wells are equipped with ESP units. Of the injection wells, there are 140 in the active stock. The exploitation factor of production wells for 2023 was 0.95 with an average water cut of 74.1%. More than half of the wells — 102 wells — operate with a water cut of more than 75%, including 69 wells with a water cut of more than 90% (Fig. 11).

Analysis of the compensation of withdrawals by injection showed that the development of the facility is accompanied by a significant overcompensation of withdrawals by water injection. The current compensation for the facility as a whole was 192%, accumulated — 411.6%. The energy state for the UV1 facility as a whole is satisfactory. In the withdrawal zone, the reservoir pressure has de-

creased by — 28% and is 20.2 MPa, in the injection zone by — 10% and is 25.1 MPa.

Based on the analysis of the development of reserves, some patterns of the mechanism of development of oil reserves and clarification of the location of residual reserves by area and section of the reservoir were determined in order to justify complex geological and technological measures aimed at improving the state of development [15, 16].

The UV1 object is at a late stage of development. Cumulative oil recovery at the UV1 object as of 01.01.2024 amounted to 73% of the initial recoverable reserves (categories A+B1). The current oil recovery factor is 0.275 units. The rate of recovery from the initial recoverable involved reserves amounted to 0.9%, from the current — 2.2%.

The maximum oil production was obtained from wells located in contraction zones, usually confined to zones of maximum oil-saturated thicknesses with high reservoir compartmentalization and permeability heterogeneity.

It is obvious that the degree of development of oil reserves (72.3%) does not correspond to the current water cut of production (85.2%), which indirectly indicates that today there are oil reserves that are not involved in development.

The site contains two hydrodynamically isolated deposits of the layered dome type, lithologically screened (Deposit 1 and Vostochnaya), which are characterized by low filtration-capacity properties and low oil-saturated thicknesses.

Factors complicating the process of extracting oil reserves include the following: a significant portion of

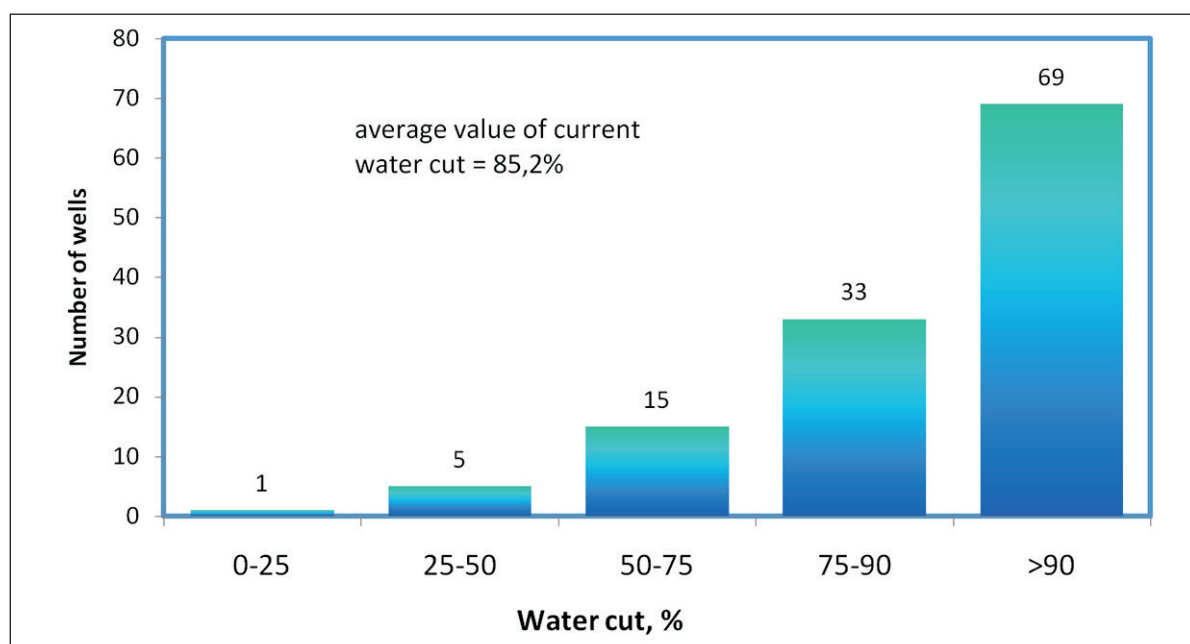


Fig. 11. Distribution of the operating well stock by water cut. Object UV1. Source Compiled by the authors



the reserves is concentrated in the water-oil zone; low reservoir properties of the deposits; the formation is not consistent across the section.

The reasons for high water cut or its sharp increase during operation were:

- breakthroughs of injected water from injection wells;
- depletion of reserves by a production well;
- flooding by bottom waters (mainly the Eastern deposit).

Based on a comprehensive analysis of the map data, current water cut areas with watered wells (Fig. 10) are identified, corresponding in plan to areas of high geological heterogeneity. Based on the results of the FGT data analysis for wells, watered intervals are identified – characterized as highly permeable intervals of the formation washed by injected water. Injection wells in these areas are considered as candidate wells for performing work on leveling the well inflow profile using flow-diverting technologies. The objects of impact are, first of all, layered heterogeneous reservoirs developed as a single object and in which the permeability coefficients of individual layers differ several times.

Also, in conditions of high permeability heterogeneity along the section, uneven penetration of drilling mud filtrate occurs during drilling of new wells and sidetracks. By assessing and identifying zones and areas of increased heterogeneity, it becomes possible to individually select drilling muds based on aphron compounds for new wells. Aphron compounds are compounds that are usually created using nanoparticles, surfactants, etc. [17, 18, 19]. These drilling muds allow to slow down the rate of filtrate penetration, which helps to reduce the radius of contamination of the bottomhole formation zone. Which in turn reduces additional costs (bottomhole treatment, hydraulic fracturing, etc.) for well development [20, 21].

## DISCUSSIONS

The question of studying geological heterogeneity in order to investigate its influence on oil production processes has been asked for many years [2–5, 22]. Many authors call permeability the main geological parameter that has the greatest influence on the direction of filtration flows [3]. The described in this article studies have confirmed this hypothesis, using the example of studied UV1 formation, the main parameter that controls premature water cut is permeability. It is very variable, both in area and in section.

The theoretical significance of the obtained results lies in the creation of a universal method for assessing geological heterogeneity applicable to all conventional oil fields. The practical significance is seen in the tool, with the help of which it is possible to select and justify geological and technical measures with greater efficiency, as well as to prevent premature breakthroughs of injected or bottom waters to the well bottoms.

## CONCLUSION

As a result of the comprehensive analysis of geological heterogeneity using the example of the UV1 formation, the following results were obtained:

- the productive UV1 formation accumulated in a coastal-marine environment, which is confirmed by changes in sandiness, porosity and permeability along the section;
- in general, the object under study is characterized by high heterogeneity, both in plan and in section, the most variable indicator is the permeability coefficient;
- areas of increased geological heterogeneity, as a rule, belong to several sedimentation sub-environments: highly permeable and highly porous, sandy bar bodies and highly dissected, low permeability and sandiness sub-environments of rip currents and storm waves;
- almost all areas are characterized by increased water content, as a result of the breakthrough of injected water through the upper highly permeable layers.

Taking into account the obtained research results, effective regulation of the filtration process in the UV1 formation seems possible by creating conditions for the redistribution of filtration flows and involving previously undrained low-permeability intervals in the development using flow-diverting technologies of the physicochemical methods of enhanced oil recovery (FCMEOR).

The use of technologies for leveling injectivity profiles in zones with high permeability heterogeneity will significantly reduce the volumes of injected and produced water and involve previously undrained oil reserves in development.

Another effective solution is drilling production horizontal wells or sidetracks with horizontal termination in undrained or poorly drained zones. However, there is a problem of contamination of the bottomhole formation zone by penetration of drilling mud filtrate. In such cases, it becomes appropriate to use drilling muds, which are a thickened heterogeneous system of surfactants, biopolymers and aphrons – nanoparticles.



## REFERENCES

1. Ivanova M.M., Timofeev V.A., Vagin S.B., Vezirova I.S., Gutman I.S. and etc. Oil and gas field geology. Terminological reference book. Ed. Ivanova M.M., Nedra; 1982.
2. Demytyev L.F. On the concept of “Geological heterogeneity of productive strata” and methods of its study. Proceedings of the Perm branch of Giprovnostokneft, issue 1. Perm, Perm book publishing house; 1965.
3. Semin E.I. Geological heterogeneity of layers and some methods of its study. – Proceedings of the All-Russian Research Institute. 1962; 34: 3–43.
4. Kotenev, Yu. A. Geological and industrial criteria for differentiation of residual oil reserves and methods of their development / Yu. A. Kotenev, V. M. Chilikin, R. V. Klimin. Geology. News of the Department of Earth Sciences and Natural Resources. 2023; 33: 69–82. – <https://doi.org/10.24412/2949-4052-2023-4-69-82>. – EDN QTFSQD.
5. Shabrin N.V., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Mashkova E.A. Justification of geological criteria for the distribution of residual oil reserves of Jurassic deposits and technologies for their development. Oil. Gas. Innovations. 2022; 12 (265): 20–26.
6. Histogram method /S.I. Solonin Ekaterinburg; 2014.
7. GOST R ISO/TO 10017-2005. Statistical methods. Guide for application in accordance with GOST R ISO 9001. M.: Rosstandart; 2005.
8. Baraboshkin E.Yu. Practical sedimentology. Terrigenous reservoirs. Manual for working with core. Tver, OOO “Izdatelstvo GERS”; 2011.
9. Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Makhnytkin E.M., Chudinova D.Yu., Rabaev R.U., Wei C., Zhou C. Production of oil reserves from different facial zones of the reservoir. Oil. Gas. Innovations. 2023; 1 (267):41–46.
10. Wei, J., Zhou, X., Shamil, S., Yuriy, K., Yang, E., Yang, Y., Wang, A. Lithofacies influence characteristics on typical shale pore structure. Energy. 2023; 282. 128728. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128728>
11. The influence of lithofacies features and tectonic structure on the distribution of reservoir filtration and capacity properties / V.V. Nikiforov, Sh. Sultanov, N.V. Shabrin, A.R. Sharafutdinov. Scientific works of NIPI Neftgaz SOCAR. 2023; 2: 9–15. – <https://doi.org/10.5510/OGP20230200840>. – EDN PMFURI.
12. Selection of effective geological and technical measures taking into account the lithofacies features of sedimentation of productive deposits / V. V. Nikiforov, N. V. Shabrin, A. R. Sharafutdinov [et al.]. Modern technologies in the oil and gas business – 2022: Collection of works of the international scientific and technical conference, Oktyabrsky, March 25, 2022. Oktyabrsky: Ufa State Petroleum Technological University; 2022. – EDN XNMEAG.
13. Arefyev S.V., Nikiforov V.V., Kotenev Yu.A., Shabrin N.V., Sharafutdinov A.R. Features of the development of oil reserves of the Jurassic-Lower Cretaceous deposits based on the clarification of the lithofacies structure of the field. Oil. Gas. Innovations. 2022; 3 (256): 26–31. EDN: ULZUHW
14. Fazylova L.R., Sultanov Sh.Kh., Nikiforov V.V. Assessment of the influence of heterogeneity of Lower Cretaceous reservoirs on the development of reserves / Collection of scientific papers of the 43<sup>rd</sup> International Scientific and Technical Conference dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of the Ufa State Petroleum Technological University branch in Oktyabrsky. Materials in 2 volumes. Ufa State Petroleum Technological University; 2016. EDN: XBQORD
15. Shabrin N.V., Nikiforov V.V., Sharafutdinov A.R. Influence of technological factors on the development of reserves on the example of the Shaim region deposit. Actual problems of science and technology – 2023: collection of materials of the XVI Int. scientific and practical. conf. of young scientists and specialists. Ufa; 2023. (1): 119–120.
16. Stenkin A.V., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Mukhametshin V.V., Nikiforov V.V. Increasing the efficiency of oil reserves development in the Jurassic deposits of the Shaim region / A.V. Stenkin, Yu.A. Kotenev, Sh.Kh. Sultanov [et al.]. Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2018; 4: 53–57. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-4-53-57>. EDN: YVJFCR.
17. Rabaev R. U. On the issue of using aphron-containing drilling fluids for drilling wells in complicated conditions at the fields of the Black Sea shelf. Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products. 2021; 5 (133):9–23. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-5-9-23>
18. Tadros T.F. Formulation of Disperse Systems. Singapore: Wiley-VCH; 2014.
19. Kinchen D., Peavy M.A., Brookey T., Rhodes D. Case history: Drilling Techniques Used in Successful Redevelopment of Low Pressure H<sub>2</sub>S Gas Carbonate Formation. Materials of SPE/ IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands. 2001. Paper Number SPE-67743-MS. <https://doi.org/10.2118/67743-MS>
20. L. Jiangtao, Zh. Xiaofeng, G. Abdumalik, Sh. Sultanov. Study on production performance characteristics of horizontal wells in low permeability and tight oil reservoirs. Energy. 2023; 284: 129286. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129286>



21. Yan Ying, Chen Huan, Wei Jianguang, Gayubov A.T., Zhou Qiaofeng, Nuriyev A.A., Chilikin V.M. Experimental study of hydraulic fracture conductivity during shale oil production. Oil and Gas Business. 2024; 22(4): 26–36. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-4-26-36>

22. The influence of the geological structure of productive deposits of the Middle Ob region deposits on the efficiency of geological and technical measures / D.Yu. Chudinova, A.Yu. Kotenev, E.M. Makhnitkin [et al.]. Geology. News of the Department of Earth Sciences and Natural Resources. 2023; 32:38–51. — <https://doi.org/10.24412/2949-4052-2023-3-38-51>. — EDN VZPUFQ.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yuri A. Kotenev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Geology and Exploration of Oil and Gas Fields, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, [geokot@inbox.ru](mailto:geokot@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8980-4897>

**Shamil Kh. Sultanov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Director of the Department of the Scientific Center of Mining and Metallurgical Engineering “Rational Development of Liquid Hydrocarbon Reserves of the Planet”, Professor of the Department of Geology and Exploration of Oil and Gas Fields, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, [ssultanov@mail.ru](mailto:ssultanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3481-9519>

**Aleksandr V. Chibisov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of the World-Class Research Center “Rational Development of Liquid Hydrocarbon Reserves of the Planet”, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, [z077@mail.ru](mailto:z077@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1382-2391>

**Viktor M. Chilikin** – engineer of the department of the World-Class Research Center “Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet”, assistant of the department of “Geology and exploration of oil and gas fields”, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, [cleanlist867@mail.ru](mailto:cleanlist867@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-0105-1322>

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Yu.A. Kotenev** – academic advising, final conclusions.

**Sh.Kh. Sultanov** – scientific editing; research concept.

**A.V. Chibisov** – analysis of literature and previous studies; text revision.

**V.M. Chilikin** – writing the original text; conducting heterogeneity and development analysis.

**The authors declare no conflicts of interests.**

The article was submitted 07.09.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 09.10.2024.



## Комплексная оценка геологической неоднородности пластовых систем при решении задачи регулирования процесса выработки запасов нефти

Юрий Алексеевич Котенев , Шамиль Ханифович Султанов , Александр Вячеславович Чибисов ,  
Виктор Максимович Чиликин\* 

Научный центр мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [cleanlist867@mail.ru](mailto:cleanlist867@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На сегодняшний день детальное изучение геологического строения месторождений нефти и газа имеет огромное значение. Изучение и формализация геологического строения видится возможным с помощью анализа геологической неоднородности. Геологическая неоднородность оказывает значимое влияние на степень вовлечения объема залежи в процессе дренирования, определяет доминирующие направления фильтрационных потоков и характер вытеснения нефти в процессе заводнения пласта. **Методы и материалы.** В работе представлены статистические показатели основных характеристик пласта – пористости, проницаемости, расчленённости, песчаности, а также комплексные показатели макро- и микро-неоднородности по распределению проницаемости. Приведенные характеристики позволяют оценить изменчивость коллектора как по площади, так и по разрезу, т.е. в объеме нефтегазоносного пласта. **Результаты.** В данной работе освещены результаты комплексного анализа микро- и макронеоднородности исследуемого объекта и сопоставления выделенных зон с промысловыми данными по эксплуатации скважин. Целью исследования является разработка на примере изучения пласта ЮВ<sub>1</sub> алгоритма подбора геолого-технологических мероприятий, в том числе применение бурения горизонтальных скважин с применением афроносодержащих буровых растворов на основе выявления геологических и промысловых причин преждевременной обводненности добываемой продукции и определения геологических факторов, контролирующих распределение остаточных запасов углеводородов. Определение причин преждевременной обводненности поможет не только устранять преждевременную обводненность, но и проводить работы по предупреждению. **Заключение.** Установленные причины преждевременной обводненности скважин в результате проведенного анализа позволят определить перспективные направления по оптимизации системы разработки: пересмотр сетки скважин, бурение новых горизонтальных добывающих и нагнетательных скважин, изменение режимов работы, применение потокоотклоняющих технологий и т.д. Установление направлений движения флюида с помощью анализа неоднородности помогает определить источники воды, которая преждевременно поступает в скважину (подовшенные или нагнетаемые воды).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геологическая неоднородность, пласт ЮВ<sub>1</sub>, обводненность, статистический анализ, афроносодержащие буровые растворы.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-297 в рамках программы создания и развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Котенёв Ю.А., Султанов Ш.Х., Чибисов А.В., Чиликин В.М. Комплексная оценка геологической неоднородности пластовых систем при решении задачи регулирования процесса выработки запасов нефти // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 5. С. 473–484. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-5-473-484>. – EDN: NRIKVL.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшнем этапе развития нефтегазовой отрасли остается актуальной проблема нерав-

номерной выработки запасов нефти. Одним из основных факторов, оказывающим влияние, является геологическое строение коллектора. Изучение геологической неоднородности пласта позволяет каче-



ственно и количественно оценить строение коллектора. Под этим термином понимается изменчивость петрофизических свойств и формы залегания коллектора в пределах горизонта или эксплуатационного объекта, которая влияет на характер перемещения жидкостей и газа при добыче, распределение в объеме продуктивного пласта запасов УВ [1].

Основная цель исследований — это получение полного представления о геологической неоднородности пласта ЮВ1 для определения степени ее влияния на процесс выработки запасов. Данная цель обуславливает выполнение следующих задач: изучение микро- и макронеоднородности с помощью статистических методов; анализ геолого-промысловой информации; выявление геологических факторов, оказывающих наибольшее влияние на неравномерность продвижения фронта нагнетаемой воды и причин разноскоростной выработки запасов УВ.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Изучение геологической неоднородности многими учеными проводится путем разделения ее на несколько уровней — микро- и макронеоднородность [2–5]. Под макронеоднородностью понимается изменчивость фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора, а под макронеоднородностью — изменчивость пространственного распространения коллектора внутри залежи или эксплуатационного объекта [3, 5]. Количественно оцениваются эти параметры с помощью коэффициентов пористости, проницаемости (микронеоднородности), расчлененности, песчанистости, распространения коллектора и т.д. (макронеоднородности).

Оценка геологической неоднородности выполняется путем применения статистических инстру-

ментов, как правило, с помощью дескриптивной статистики.

Описательная или дескриптивная статистика — это сбор и обработка, т.е. систематизация массива данных, как правило, количественных, проводимая с целью превращения его в практическую для анализа форму [6]. Основная цель данной методики заключается в представлении обработанных данных в виде гистограмм, кроссплотов, графиков и таблиц, а также их описание с помощью основных показателей статистики (Min, Max,  $\sigma$  и т.д.) [7]. Соответственно, существует три вида представления систематизированных данных: 1) в виде графических материалов — графики, диаграммы, гистограммы, карты, 3Д кубы и т.д.; 2) в виде таблиц, упорядоченных и сгруппированных данных; 3) в виде показателей, описывающих статистику.

Статистические показатели делятся на две группы [7]: 1) показатели, характеризующие центр группирования данных ( $\bar{x}_{\text{ариф}}$ , Me, Mo и т.д.); 2) показатели, характеризующие рассеивание данных (D,  $\sigma$ , R и т.д.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемый объект представляет собой две залежи пластово-сводового типа, коллектор терригенного состава представлен песчано-алеврито-глинистым материалом, покрышка представлена аргилитами тогурской пачки.

Формирование отложений происходило в морской обстановке, а именно в прибрежно-морском комплексе в обстановке прибрежно-морской равнины, но с довольно расчлененным рельефом поверхности среды седиментации. На возвышенных частях палеорельефа происходило отложение баровых тел вытянутой формы, преимущественно, северо-западного простирания (рис. 1) с увеличенным

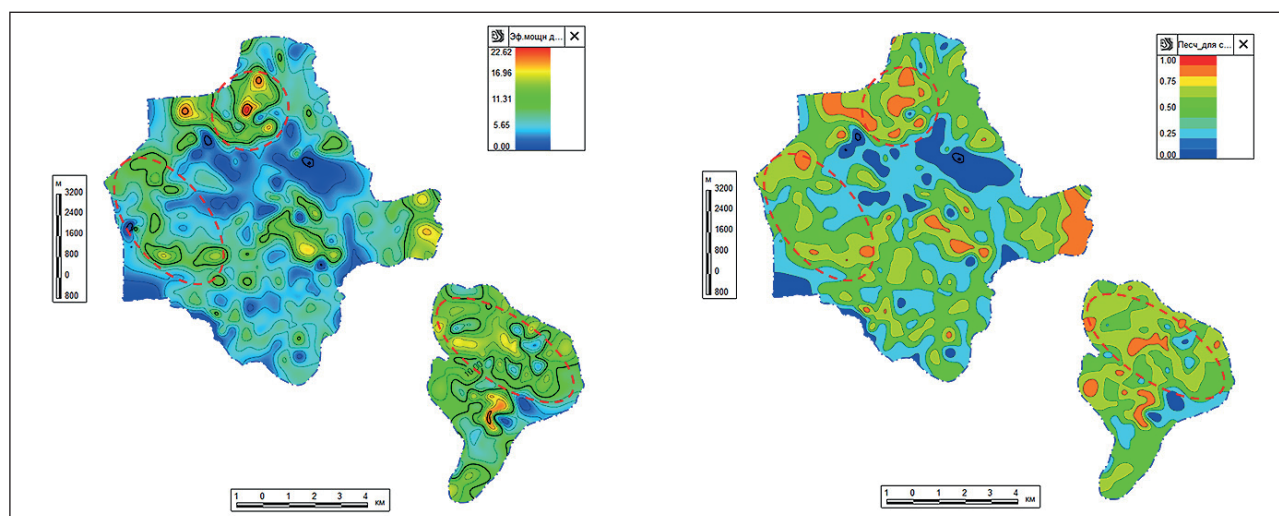


Рис. 1. Карты эффективной мощности и песчанистости пласта ЮВ1. Источник составлен авторами



количеством песчаного материала. В пониженных частях палеорельефа отмечается неравномерное чередование глинистых и песчаных пропластков, что характерно для отложений буферных зон между баровыми телами с часто меняющимся гидродинамическим режимом седиментации (субобстановка приливных течений и штормовых волн) [8, 9, 10]. Обстановка осадконакопления оказывает наибольшее влияние на распределение фильтрационно-емкостных свойств [11–14].

Согласно проведенному статистическому анализу, коэффициент пористости в пределах исследуемого объекта изменяется от 0,108 до 0,256 долей единиц. Среднее значение пористости по пласту ЮВ1 для рассматриваемого месторождения составляет 0,158 долей единиц.

Согласно гистограммному анализу, распределение коэффициента пористости близко к нормальному (т.е. медиана, мода и среднее значение практически равны друг другу), наибольшая частота вскрытия (11,35%) принадлежит интервалу [0,152; 0,160] (рис. 2). Также высокой частотой вскрытия (10,85 и 10,36%) характеризуются интервалы [0,160;

0,167] и [0,145; 0,152] соответственно. В плане пористость внутри отдельной залежи распределяется относительно равномерно (рис. 3). Средняя пористость восточной залежи составляет 0,169 д.ед, а западной – 0,155 д.ед.

Для изучения распределения коэффициента пористости в разрезе проанализирован геолого-статистический разрез (ГСР), для увеличения наглядности данные были разделены на 4 условных класса с равным шагом (0,037 д.ед.) – 0,108–0,145, 0,145–0,182, 0,182–0,219, 0,219–0,256 д.ед. (рис. 4). Высокие значения коэффициента пористости (> 0,182 д.ед.) распределяются относительно равномерно по всей толщине пласта ЮВ1. Частота встречаемости низких значений  $K_p$  (от 0,108 до 0,145 д.ед.) изменяется следующим образом: 13% в верхней части пласта (слои 1–19), 35% в средней части пласта (слои 20–38), 45% в нижней части пласта (слои 39–57). Среднее значение коэффициента пористости по разрезу представлено на рис. 5.

Второй анализируемый авторами параметр, который позволяет оценить микронеоднородность пласта, – это коэффициент проницаемости. Рас-

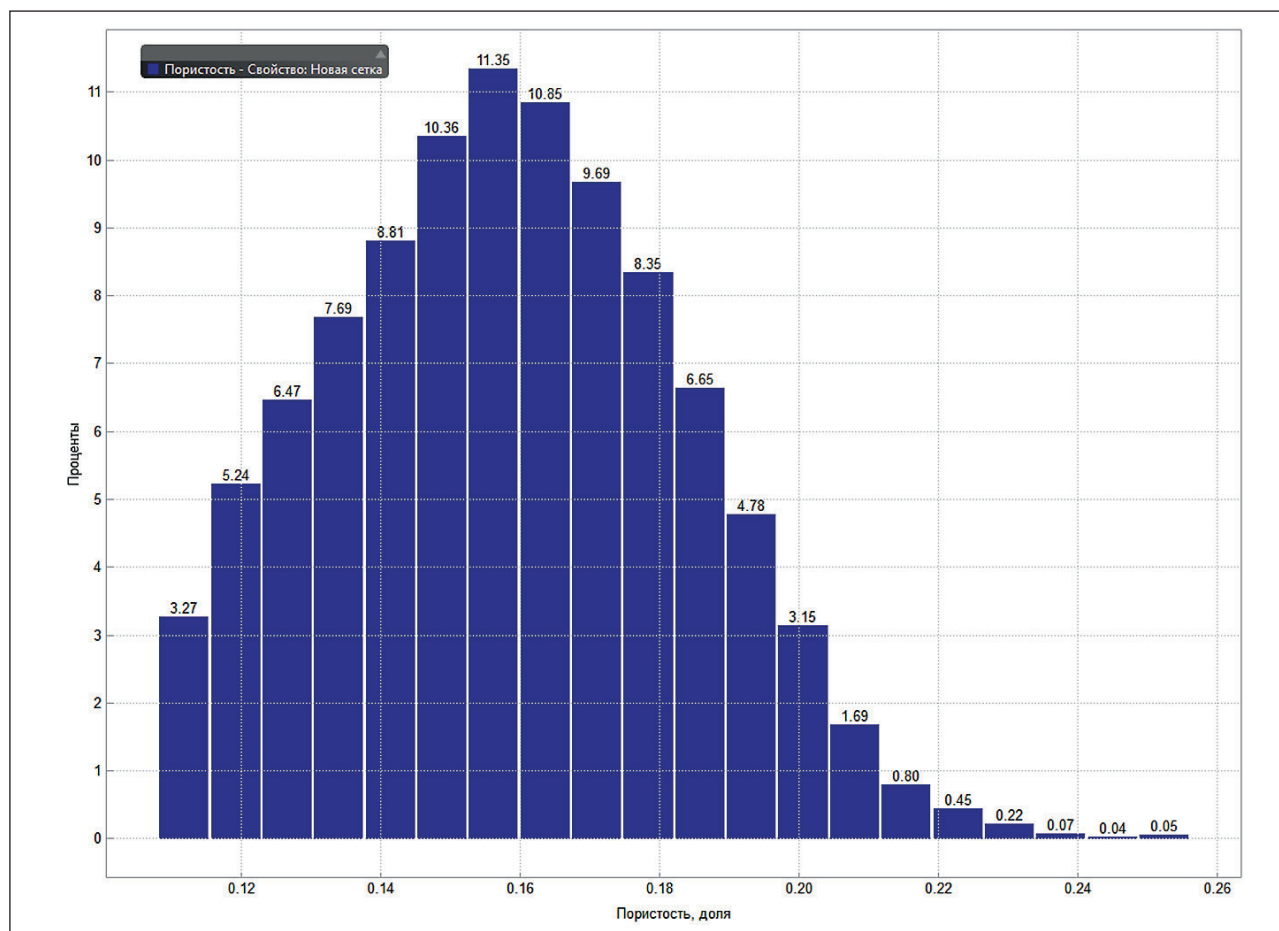


Рис. 2. Гистограмма коэффициента пористости пласта ЮВ1. Источник составлен авторами



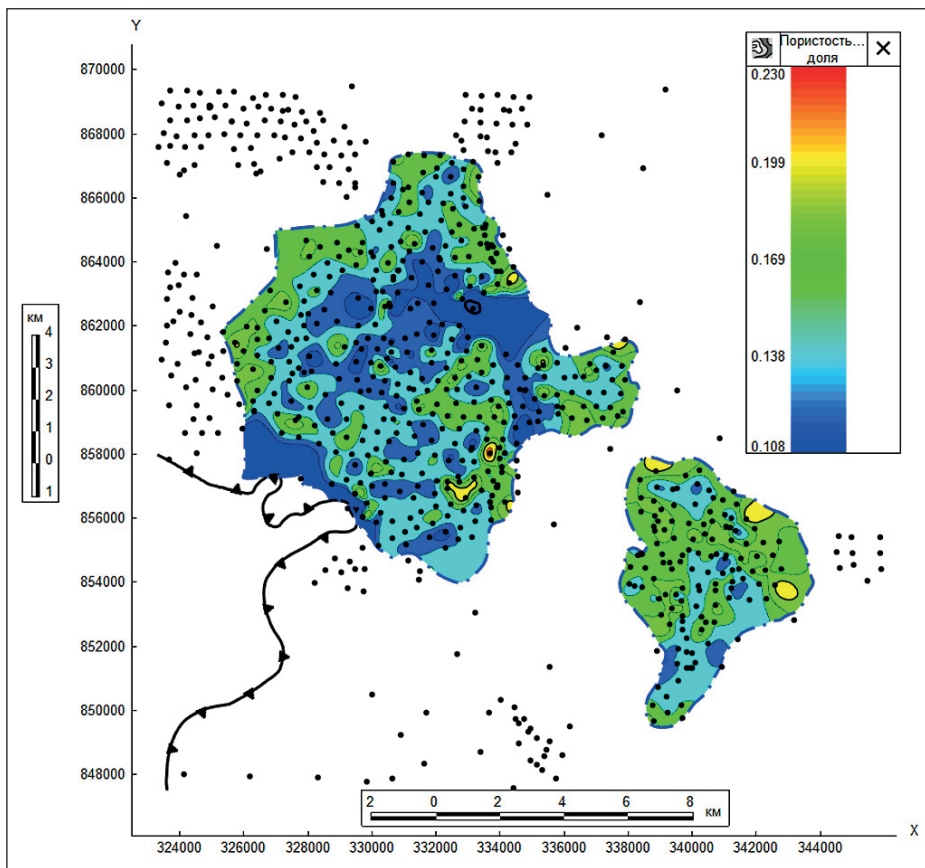


Рис. 3. Карта коэффициента пористости пласта ЮВ1. Источник составлен авторами

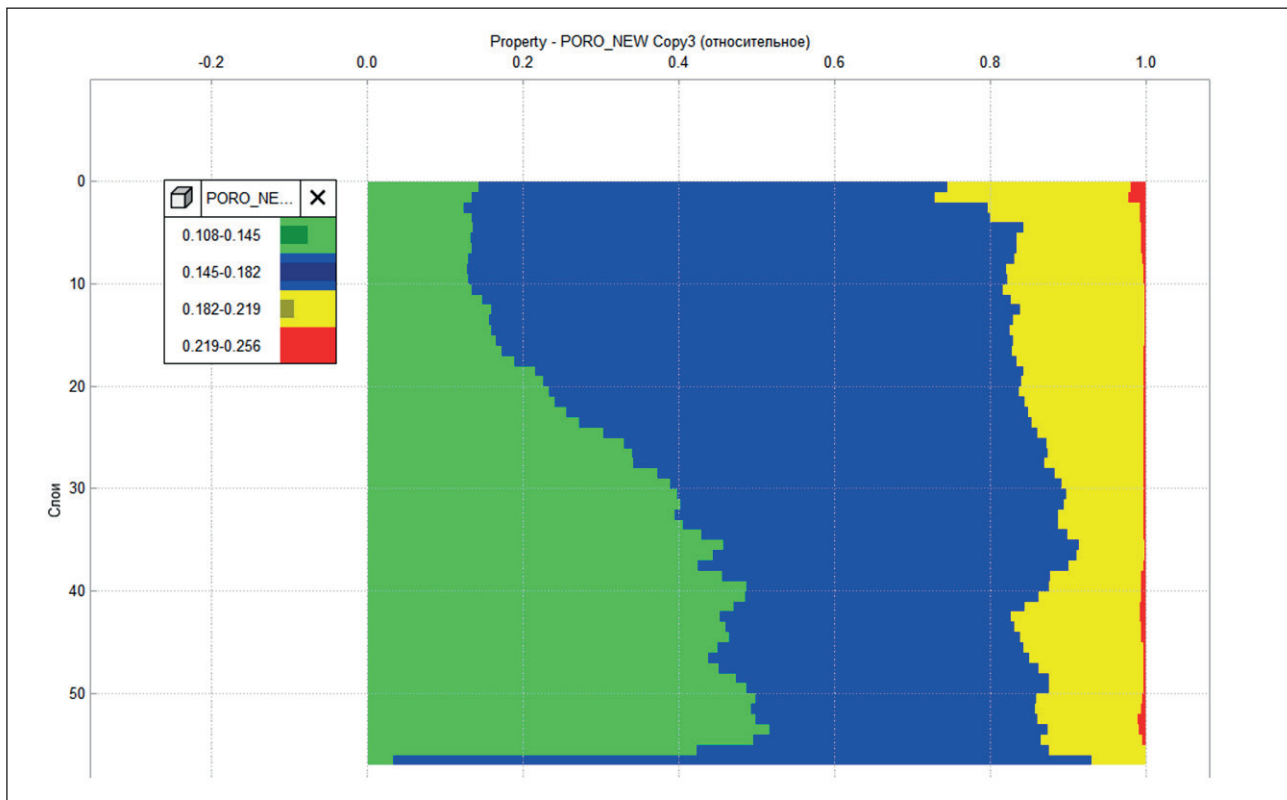


Рис. 4. ГСР коэффициента пористости пласта ЮВ1. Источник составлен авторами



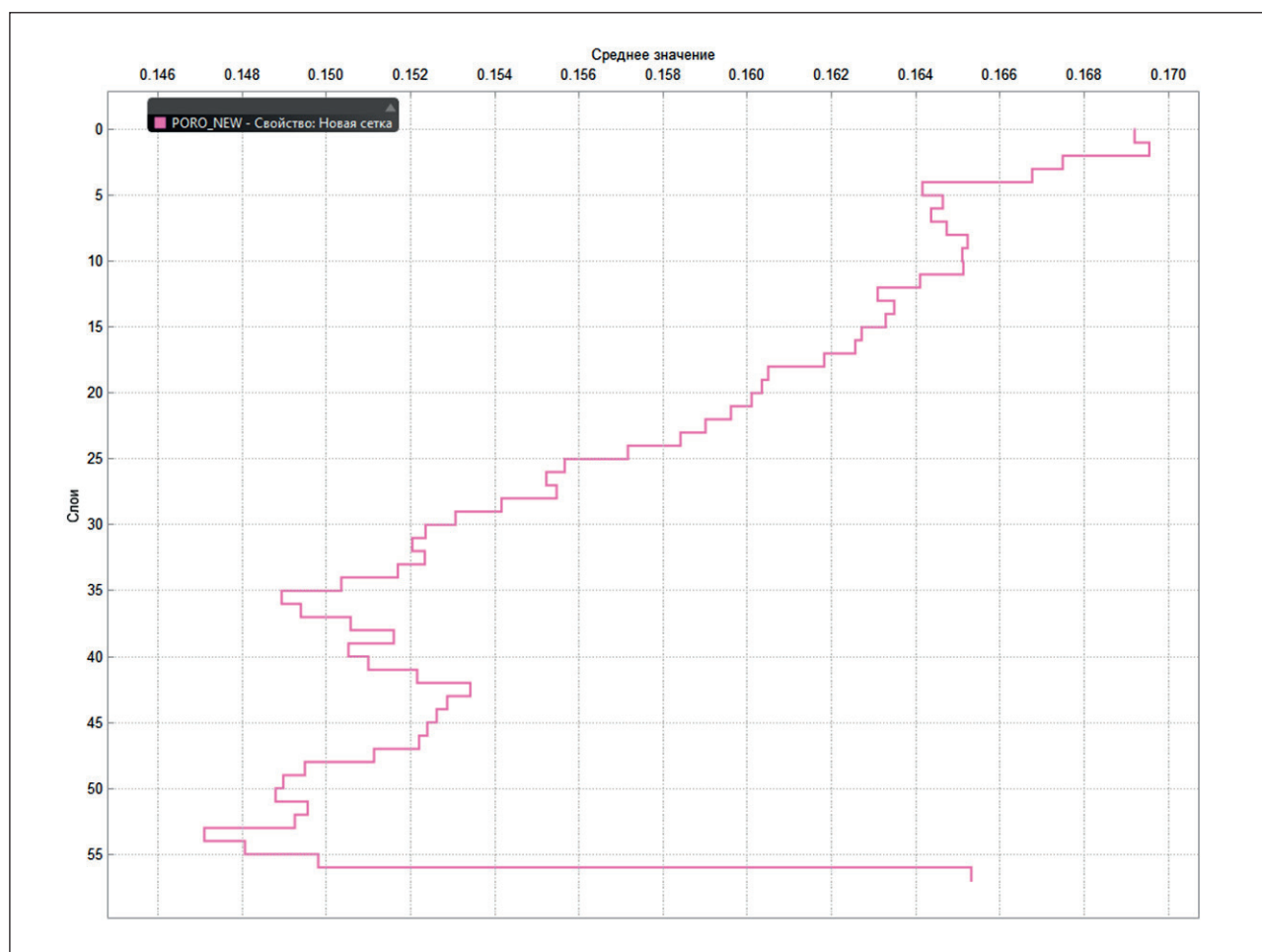


Рис. 5. Среднее значение коэффициента пористости по разрезу пласта ЮВ1. Источник составлен авторами

пределение этого параметра — логонормальное (т.е. логарифм случайной величины, имеет нормальное распределение) (рис. 6), минимальные значения равны  $0,12 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, максимальные —  $300 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> ( $R = 299,88 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>), среднее значение —  $18,86 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, медиана —  $5,02 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Наибольшая частота вскрытия — 8,1%, принадлежит интервалу от  $4,1 \cdot 10^{-3}$  до  $6,04 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>.

По площади распределение коэффициента проницаемости относительно равномерное, за исключением локальных повышений проницаемости, возможно, связанных с наличием проводящих разломов в этих областях (рис. 7). Дополнительно была подсчитана неоднородность по проницаемости для оценки ее по разрезу:

$$K_{\text{неор.пр.}} = K_{\text{пр.макс.}} / K_{\text{пр.ср.}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{пр.макс.}}$  — максимальное значение коэффициента проницаемости в скважине, а  $K_{\text{пр.ср.}}$  — средневзвешенное значение коэффициента проницаемости в этой же скважине.

Участки, где данный показатель численно превышает значение 5-ти, считаются высоконеоднородными по проницаемости в разрезе. Стоит также отметить, что проницаемость повторяет тренд пористости по уменьшению среднего значения от кровли пласта коллектора к его подошве (рис. 8).

Аналогичный анализ с использованием дескриптивной статистики был проведен для оценки макронеоднородности. Коэффициент расчлененности изменяется от 0 до 10,4 ед, среднее значение по пласту ЮВ1 — 4 ед. Высокие значения этого показателя (от 7 до 10 ед.) сосредоточены в буферных зонах песчаных баров, т.е. в тех местах палеорельефа, где, по условиям, образованием происходило частое изменения гидродинамического режима, вследствие чего поочередно накапливался песчаный и глинистый материал.

Коэффициент песчанистости изменяется от 0 до 1 д.ед, среднее значение — 0,5 д.ед (рис. 1). В плане данный показатель распределяется относительно равномерно, повышенные значения (0,65–1 д.ед) встречаются в баровых телах, северо-западного пространства. Восточная залежь, по сравнению с за-



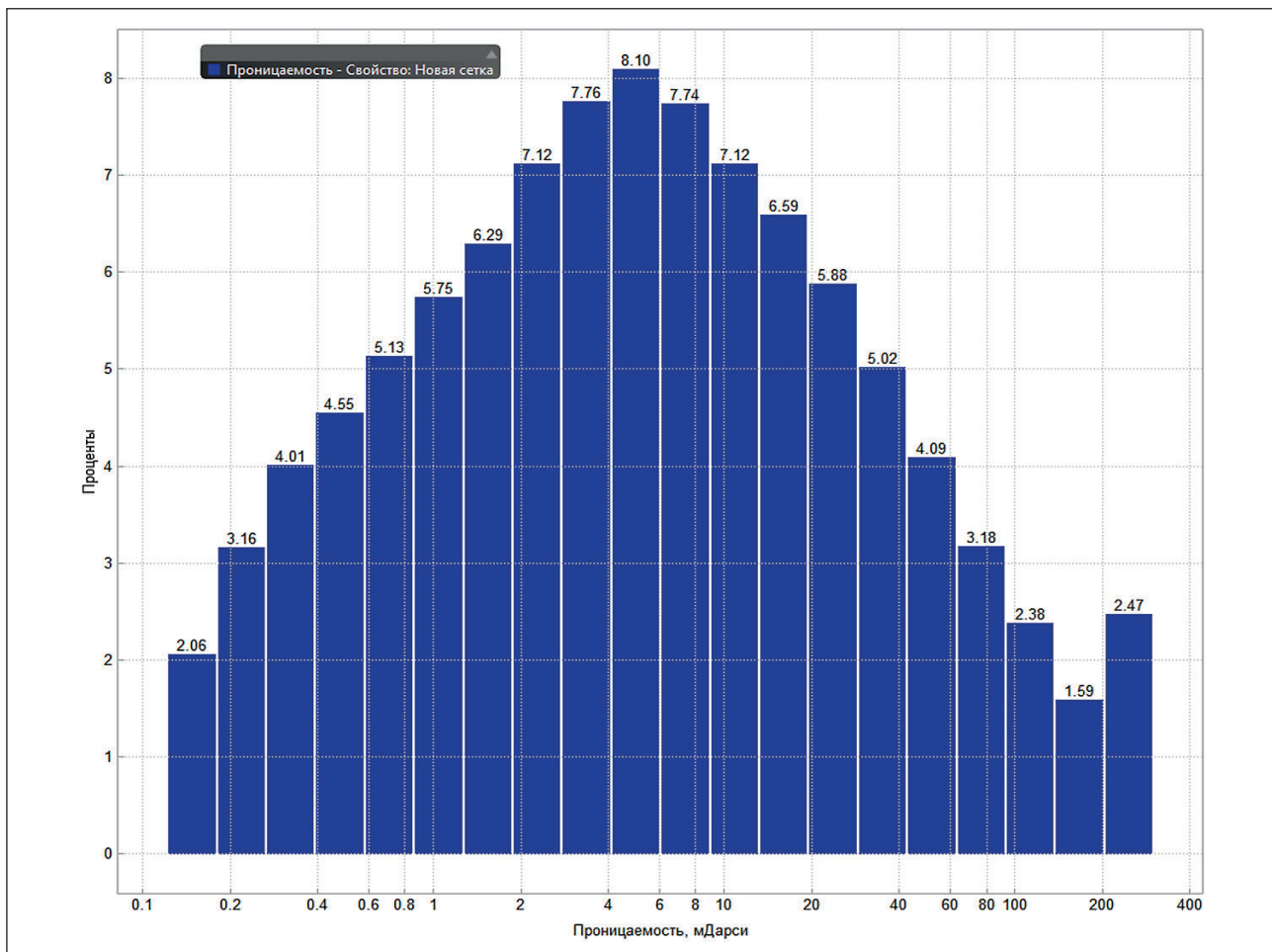


Рис. 6. Гистограмма коэффициента проницаемости пласта ЮВ1. Источник составлен авторами

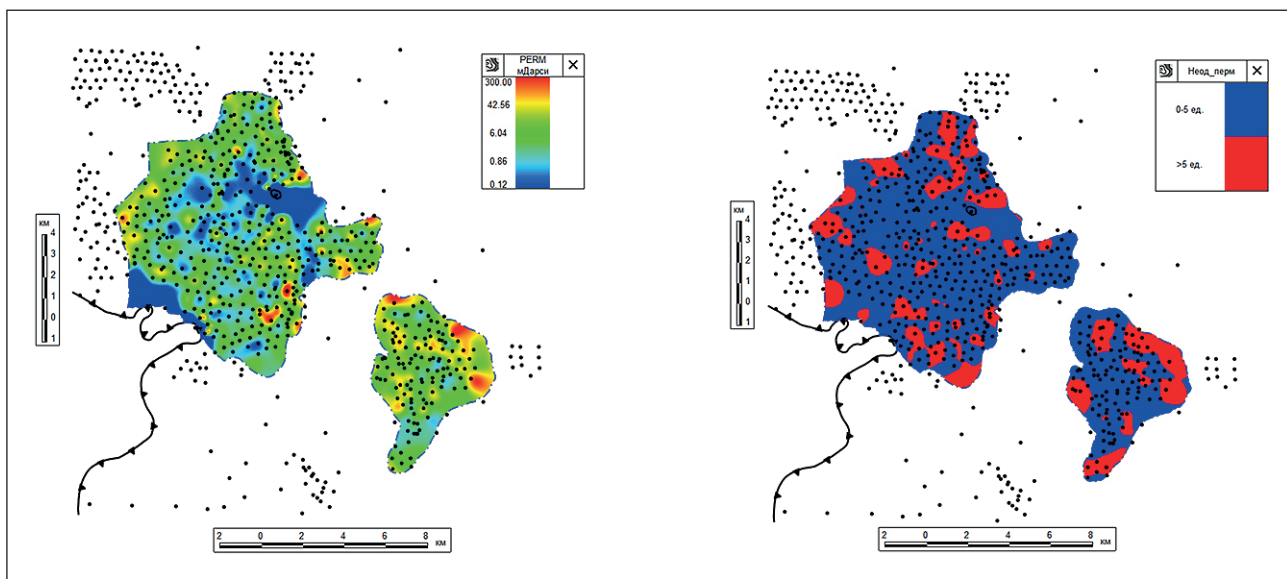


Рис. 7. Карта коэффициента проницаемости и неоднородности по проницаемости в разрезе пласта ЮВ1. Источник составлен авторами



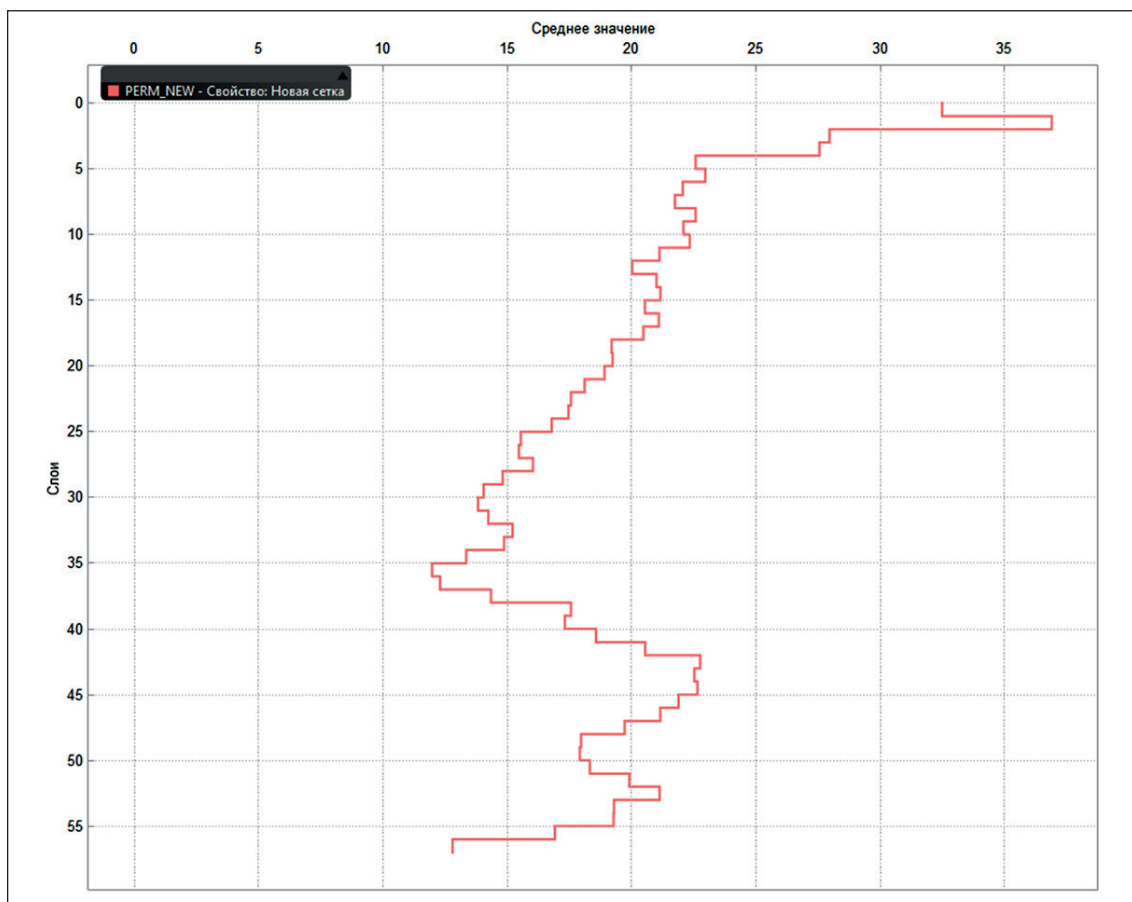


Рис. 8. Медиана распределения коэффициента проницаемости по разрезу пласта ЮВ1.

Источник составлен авторами

падной, в среднем, отличается более высокой песчаностью — 0,48 и 0,58 д.ед., соответственно. Распределение коллектора по разрезу совпадает с типовым разрезом прибрежно-морских отложений (рис. 9).

В дополнение к данным исследованиям авторами был оценен комплексный показатель макронеоднородности, характеризующий расчлененность исследуемого объекта на единицу мощности пород-коллекторов. В среднем, по пласту ЮВ1 упомянутый показатель равен 0,61 ед/м. Для баровых отложений он равен относительно низким значениям, что говорит о более высоких толщинах песчаных пропластков в этих областях.

Исходя из реализованных карт, гистограмм и ГСР, авторами были выделены 4 области повышенной геологической неоднородности (рис. 10 и табл. 1).

1 область характеризуется высокой неоднородностью проницаемости в разрезе и плане ( $0,15 \cdot 10^{-3}$  до  $122 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>), среднее значение коэф. пористости равно 0,15 д.ед, в южной части этой области наблюдаются значения до 0,11 д.ед., расчлененность соответствует средней по пласту — 4 ед., коэффициент песчаности выше, чем средние по пласту

и составляет 0,53 д.ед., комплексный показатель макронеоднородности равен 0,65 ед/м.

2 область отличается высокой расчлененностью (среднее значение 4,4 ед.), особенно в северной части (до 10 ед.), проницаемость особенно неравномерно распределяется в разрезе, среднее значение коэффициента пористости составляет 0,15 д.ед., песчаность практически равна средней по пласту, пониженные значения располагаются в восточной части данной области, комплексный показатель макронеоднородности равен 0,7 ед/м, что говорит об относительно пониженной толщине пропластков-коллекторов.

3 область в среднем имеет достаточно высокую проницаемость, в плане ее распределение достаточно равномерное, однако по разрезу имеется очень сильный разброс, коэффициент пористости равен 0,15 д.ед., расчлененность достаточно низкая и в северной части равна 1 ед., песчаность ниже среднего по пласту и составляет 0,46 д.ед., комплексный показатель макронеоднородности равен 0,65 ед/м.

4 область в целом отличается повышенными характеристиками относительно средних по пла-



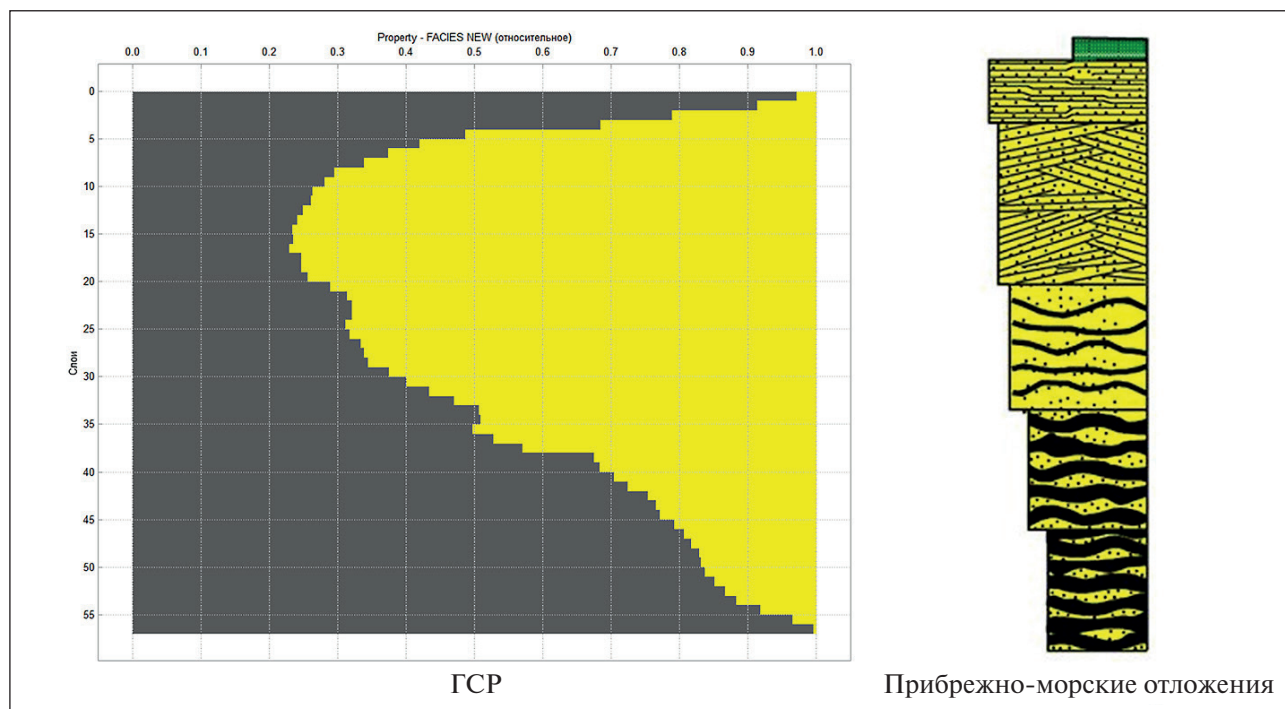


Рис. 9. ГСР по кубу литологии по пласту ЮВ1. Источник ГСР составлен авторами, схема [6]

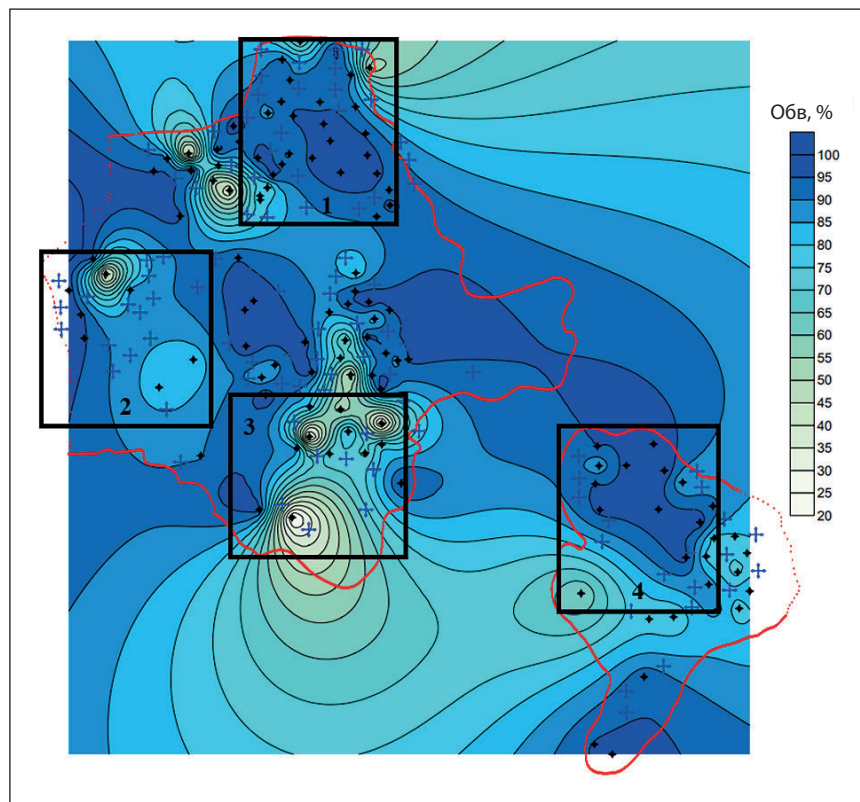


Рис. 10. Карта текущей обводненности пласта ЮВ1. Источник составлен авторами

сту, особенно по проницаемости —  $12,7 \cdot 10^{-3}$  и  $23,5 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, соответственно, также данная область характеризуется высокой изменчивостью проницаемости по разрезу, среднее значение коэф-

фициента пористости составляет 0,17 д.ед., расчлененность составляет 4,5 ед., в центре области наблюдаются низкие значения (до 1 ед.), к периферии они возрастают (до 8,5 ед.), коэффициент песчанистости



Таблица 1

## Геолого-физическая характеристика пласта ЮВ1

Исслед. объект	Микронеодн.		Макронеодн.			
	Коэф. пор., д.ед	Коэф. прони., 10 <sup>-3</sup> мкм <sup>2</sup>	Коэф. расчл., ед.	Коэф. песч, д.ед	Комп. показ. макронеод. ед/м	Коэф. распр. коллектора, д.ед
ЮВ1	0,16 0,11 – 0,26	12,7 0,12 – 300	4 0 – 10,4	0,50 0,00 – 1,00	0,61 0,00 – 2,43	0,99
1 обл.	0,15	7,3	4	0,53	0,65	1
2 обл.	0,15	8,1	4,4	0,49	0,70	1
3 обл.	0,15	12,9	3,4	0,46	0,65	1
4 обл.	0,17	23,5	4,5	0,64	0,40	1

Источник составлен авторами.

составляет 0,64 д.ед, комплексный коэффициент макронеоднородности составляет 0,4 ед/м, что говорит о повышенной толщине проницаемых пропластков.

На следующем этапе выполнено сопоставление результатов комплексной оценки геологической неоднородности с промысловыми данными эксплуатации скважин.

Формирование системы ППД на объекте ЮВ1 осуществляется с 1999 года. На основной залежи реализована обращенная семиточечная система в сочетании с очаговой, на Восточной залежи – избирательная система.

По состоянию на 01.01.2024 на объекте числится 342 скважины. Действующий добывающий фонд составляет 125 скважин. Все скважины оборудованы установками ЭЦН. Из числа нагнетательных скважин в действующем фонде находится 140. Коэффициент эксплуатации добывающих скважин за 2023 г. составил 0,95 при средней обводненности 74,1%. Более половины скважин – 102 скважины – работает с обводненностью добываемой продукции более 75%, в том числе с обводненностью более 90% – 69 скважин (рис. 11).

Анализ компенсации отборов закачкой показал, что разработка объекта сопровождается значительной перекомпенсацией отборов закачкой воды. Текущая компенсация, в целом, по объекту составила 192%, накопленная – 411,6%. Энергетическое состояние, в целом, по объекту ЮВ1 удовлетворительное. В зоне отбора пластовое давление снижено на – 28% и составляет 20,2 МПа, в зоне нагнетания на – 10% и составляет 25,1 МПа.

На основе анализа выработки запасов определены некоторые закономерности механизма выработки запасов нефти и уточнения местоположения остаточных запасов по площади и разрезу пласта с целью обоснования комплексных геолого-технологических

мероприятий, направленных на совершенствование состояния разработки [15, 16].

Объект ЮВ1 находится на поздней стадии разработки. Накопленный отбор нефти по объекту ЮВ1 на 01.01.2024 составил 73% от начальных извлекаемых запасов (категории А+В1). Текущий КИН составляет 0,275 д.ед. Темп отбора от начальных извлекаемых вовлекаемых запасов составил 0,9%, от текущих – 2,2%.

Максимальные отборы нефти получены из скважин, расположенных в зонах стягивания, как правило, приуроченных к зонам максимальных нефтенасыщенных толщин с высокой расчлененностью пласта и проницаемостной неоднородностью.

Очевидно, что степень выработки запасов нефти (72,3%) не соответствует текущей обводненности продукции (85,2%), что косвенно свидетельствует о том, что на сегодняшний день остаются запасы нефти, не вовлеченные в разработку.

На объекте выделены две гидродинамически разобщенные залежи пластово сводового типа, литологически экранированные (Залежь 1 и Восточная), которые характеризуются низкими фильтрационно-емкостными свойствами и невысокими нефтенасыщенными толщинами.

К факторам, осложняющим процесс извлечения запасов нефти, можно отнести следующие: значительная часть запасов сосредоточена в водонефтяной зоне; низкие коллекторские свойства залежей; пласт не выдержан по разрезу.

Причинами высокой обводненности или резкого ее увеличения в процессе эксплуатации послужили:

- прорывы закачиваемой воды от нагнетательных скважин;
- выработка запасов добывающей скважиной;
- обводнение подошвенными водами (преимущественно Восточная залежь).



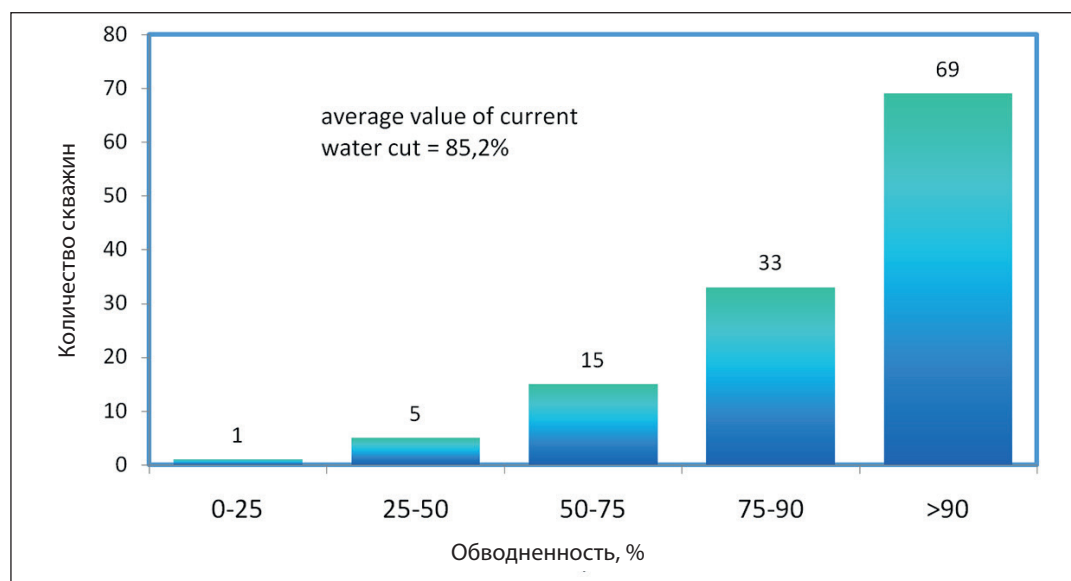


Рис. 11. Распределение действующего фонда скважин по обводненности. Объект ЮВ1. Источник составлен авторами

На основе комплексного анализа данных, на карте текущей обводненности выделены зоны с обводненными скважинами (рис. 10), соответствующие в плане участкам высокой геологической неоднородности. По результатам анализа данных ПГИ, по скважинам установлены обводненные интервалы, характеризующиеся как водопромытые нагнетаемой водой высокопроницаемые интервалы пласта. Нагнетательные скважины в эти зоны рассматриваются как скважины-кандидаты для проведения работ по выравниванию профиля притока скважин с применением потокоотклоняющих технологий. Объектами воздействия являются, прежде всего, послойно-неоднородные коллекторы, разрабатываемые как единый объект и в которых коэффициенты проницаемости отдельных прослоев различаются в несколько раз.

Также в условиях высокой неоднородности проницаемости по разрезу происходит неравномерное проникновение фильтрата бурового раствора во время бурения новых скважин и боковых стволов. С помощью оценки и выделения зон и областей повышенной неоднородности появляется возможность индивидуально подбирать для новых скважин буровые растворы на основе афронных соединений. Афронные соединения — это соединения, которые обычно создаются с использованием наночастиц, поверхностно-активных веществ и т.д. [17, 18, 19]. Данные буровые растворы позволяют замедлить скорость проникновения фильтрата, что способствует уменьшению радиуса загрязнения призабойной зоны пласта. Что, в свою очередь, уменьшает дополнительные затраты (ОПЗ, ГРП и т.д.) на освоение скважины [20, 21].

## ОБСУЖДЕНИЯ

Вопросом изучения геологической неоднородности с целью исследования ее влияния на процессы выработки нефти задаются уже многие годы [2–5, 22]. Многие авторы называют основным геологическим параметром, оказывающим наибольшее влияние на направление фильтрационных потоков, — проницаемость [3]. Наши исследования подтвердили данную гипотезу на примере нашего изучаемого пласта ЮВ1, основным параметром, контролирующим преждевременную обводненность, является проницаемость. Она весьма изменчива как по площади, так и по разрезу.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в создании универсальной методики оценки геологической неоднородности, применимой ко всем традиционным нефтяным месторождениям. Практическая значимость видится в инструменте, с помощью которого можно подбирать и обосновывать геолого-технические мероприятия с большей эффективностью, а также предупреждать преждевременные прорывы нагнетаемых или подошвенных вод к забоям скважин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплексного анализа геологической неоднородности на примере пласта ЮВ1 были получены следующие результаты:

- продуктивный пласт ЮВ1 накапливался в прибрежно-морской обстановке, что подтверждается изменениями песчаности, пористости и проницаемости по разрезу;



- в целом исследуемый объект характеризуется высокой неоднородностью как в плане, так и в разрезе, наиболее изменчивым показателем является коэффициент проницаемости;
- области повышенной геологической неоднородности, как правило, принадлежат нескольким субобстановкам осадконакопления: высокопроницаемым и высокопористым, песчаным баровым телам и высокорасчлененным, пониженной проницаемости и песчанистости субобстановкам разрывных течений и штормовых волн;
- почти все области характеризуются повышенной обводненностью, вследствие прорыва нагнетаемой воды по верхним высокопроницаемым пропласткам.

С учетом полученных результатов исследований, эффективное регулирование процесса фильтрации по пласту ЮВ1 видится возможным путем создания условий перераспределения фильтрационных пото-

ков и вовлечения в разработку ранее не дренируемых слабопроницаемых интервалов с применением потокоотклоняющих технологий ФХМУН.

Применение технологий выравнивания профилей приемистости в зонах с высокой проницаемостью и неоднородностью позволит существенно сократить объемы закачиваемой и попутно-добываемой воды и вовлечь в разработку ранее недренируемые запасы нефти.

Еще одним эффективным решением является бурение добывающих горизонтальных скважин или боковых стволов с горизонтальным окончанием в недренируемые или слабодренируемые зоны. Однако существует проблема загрязнения призабойной зоны пласта путем проникновения фильтрата бурового раствора. В таких случаях становится целесообразным применение буровых растворов, которые представляют собой загущенную гетерогенную систему из ПАВ, биополимеров и афронов – наночастиц.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванова М.М., Тимофеев В.А., Вагин С.Б., Везирова И.С., Гутман И.С. и др. Нефтегазопромысловая геология. Терминологический справочник. М.: Недра, 1982. 262 с.
2. Дементьев Л.Ф. О понятии «Геологической неоднородности продуктивных пластов» и методов ее изучения // Тр. Перм. филиал Гипровостокнефти. вып. 1. Пермь, Перм. книжн. изд-во, 1965 г.
3. Семин Е.И. Геологическая неоднородность пластов и некоторые способы ее изучения // Труды ВНИИ. 1962. Вып. 34. С. 3–43.
4. Котенев Ю.А. Геолого-промысловые критерии дифференциации остаточных запасов нефти и способы их освоения / Ю.А. Котенев, В.М. Чиликин, Р.В. Климин // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2023. № 33. С. 69–82. — <https://doi.org/10.24412/2949-4052-2023-4-69-82>. — EDN QTFSQD.
5. Шабрин Н.В., Котенев Ю.А., Султанов Ш.Х., Машкова Е.А. Обоснование геологических критериев распределения остаточных запасов нефти юрских отложений и технологии их освоения // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 12 (265). С. 20–26.
6. МЕТОД ГИСТОГРАММ / С.И. Солонин. Екатеринбург. 2014. 98 с.
7. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. М.: Росстандарт, 2005г. 49 с.
8. Барабошкин Е.Ю. Практическая седиментология. Терригенные резервуары. Пособие по работе с керном. Тверь, ООО «Издательство ГЕРС», 2011. 152 с.
9. Котенев Ю.А., Султанов Ш.Х., Махныткин Е.М., Чудинова Д.Ю., Рабаев Р.У., Вэй Ц., Чжоу Ц. Выработка запасов нефти из различных фациальных зон пласта // Нефть. Газ. Новации. 2023. № 1 (267). С. 41–46.
10. Wei, J., Zhou, X., Shamil, S., Yuriy, K., Yang, E., Yang, Y., Wang, A. Lithofacies influence characteristics on typical shale pore structure. Energy. 2023; 282. 128728. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128728>
11. Влияние литолого-фациальных особенностей и тектонического строения на распределения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов / В.В. Никифоров, Ш. Султанов, Н.В. Шабрин, А.Р. Шарафутдинов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2023. № 2. С. 9–15. — <https://doi.org/10.5510/OGP20230200840>. — EDN PMFURI.
12. Подбор эффективных геолого-технических мероприятий с учетом литолого-фациальных особенностей осадконакопления продуктивных отложений / В.В. Никифоров, Н.В. Шабрин, А.Р. Шарафутдинов [и др.] // Современные технологии в нефтегазовом деле. 2022: Сборник трудов международной научно-технической конференции, Октябрьский, 25 марта 2022 года. Октябрьский: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. С. 191–195. — EDN XNMEAG.
13. Арефьев С.В., Никифоров В.В., Котенев Ю.А., Шабрин Н.В., Шарафутдинов А.Р. Особенности выработки запасов нефти юрско-нижнемеловых отложений на основании уточнения литолого-фациального строения месторождения // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 3 (256). С. 26–31. — EDN: ULZUHW



14. Фазылова Л.Р., Султанов Ш.Х., Никифоров В.В. Оценка влияния неоднородности пластов-коллекторов нижнего мела на разработку запасов / Сборник научных трудов 43-й Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Октябрьском Материалы в 2-х томах. 2016. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. С. 267–272. (340 с.). – EDN: XBQORD
15. Шабрин Н.В., Никифоров В.В., Шарафутдинов А.Р. Влияние технологических факторов на выработку запасов на примере месторождения Шаимского региона // Актуальные проблемы науки и техники – 2023: сборник материалов XVI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Уфа, 2023. Т. 1. С. 119–120.
16. Стенькин А.В., Котенев Ю.А., Султанов Ш.Х., Мухаметшин В.В., Никифоров В.В. Повышение эффективности выработки запасов нефти юрских отложений Шаимского региона / А.В. Стенькин, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 4. С. 53–57. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-4-53-57>. EDN: YVJFCR
17. Рабаев Р.У. К вопросу применения афронсодержащих буровых растворов для бурения скважин в осложненных условиях на месторождениях Черноморского шельфа // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133). С. 9–23. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-5-9-23>.
18. Tadros T.F. Formulation of Disperse Systems. Singapore: Wiley-VCH; 2014.
19. Kinchen D., Peavy M.A., Brookey T., Rhodes D. Case history: Drilling Techniques Used in Successful Redevelopment of Low Pressure H<sub>2</sub>S Gas Carbonate Formation. Materials of SPE/ IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands. 2001. Paper Number SPE-67743-MS. <https://doi.org/10.2118/67743-MS>
20. L. Jiangtao, Zh. Xiaofeng, G. Abdumalik, Sh. Sultanov. Study on production performance characteristics of horizontal wells in low permeability and tight oil reservoirs. Energy. 2023; 284: 129286. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129286>
21. Ян Ин, Чэнь Хуань, Вэй Цзянгуан, Гаюбов А.Т., Чжоу Цяофэн, Нуриев А.А., Чиликин В.М. Экспериментальное исследование проводимости трещины ГРП при добыче сланцевой нефти // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 4. С. 26–36. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-4-26-36>
22. Влияние геологического строения продуктивных отложений месторождений Среднего Приобья на эффективность геолого-технических мероприятий / Д.Ю. Чудинова, А.Ю. Котенев, Е.М. Махныткин [и др.] // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2023. № 32. С. 38–51. – <https://doi.org/10.24412/2949-4052-2023-3-38-51>. – EDN VZPUFQ.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Котенев Юрий Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, geokot@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8980-4897>

**Султанов Шамиль Ханифович** – доктор технических наук, профессор, научный руководитель отделения НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты», профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, ssultanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3481-9519>

**Чибисов Александр Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отделения НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, z077@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1382-2391>

**Чиликин Виктор Максимович** – инженер отделения НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты», ассистент кафедры «Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, cleanlist867@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0105-1322>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Котенев Ю.А.** – научное руководство, итоговые выводы.

**Султанов Ш.Х.** – научное редактирование текста; концепция исследования.

**Чибисов А.В.** – анализ литературы и предыдущих исследований; доработка текста.

**Чиликин В.М.** – написание исходного текста; проведение анализа неоднородности и выработки.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 09.10.2024.



## PUBLICATION ETHICS AND PREVENTION OF MALPRACTICE PUBLICATION

Compliance requirements of publication ethics in the preparation and publication of the journal Science Editor and Publisher apply to all members of the publishing process, i.e., authors, editors, reviewers, and the publisher of the journal. The editorial board monitors compliance with the ethics requirements based on the manuals prepared by international specialized organizations, associations and publishers, as well as the Association of Science Editors and Publishers. The main standards relied on by the journal «Nanotechnologies in construction» are those developed by the Committee on Publication Ethics ([Committee on Publication Ethics](#)) in the United Kingdom, by the [publisher Elsevier](#) (Netherlands), and other non-Russian editorial associations and information systems, as well as the [declaration of «Ethical Principles of Scientific Publications»](#), adopted by the Association of Science Editors and Publishers (Russia).

### **The responsibility of the authors of material for the journal «Nanotechnologies in construction»**

1. The author submits materials for review, which have not been previously published. If the article is based on previously published material which are not academic articles or based on materials presented on the Internet, the author should notify the editorial staff of the journal.
2. The author does not submit the same article to different journals for review.
3. All co-authors consent to the submission of their articles to the journal.
4. The author should inform the editorial staff about a potential conflict of interest. In the case of the absence of any competing interests the author should claim that by writing «Author declare the absence of any competing interests» in the paper.
5. The author takes the necessary steps to ensure the correctness of citations in the submitted article.
6. The list of authors included only individuals who have made significant contributions to the research.
7. The author correctly cites his or her previous work as to avoid self-plagerism in the manuscript and the artificial increase of volume of publications (salami-slicing).
8. The author, who is acting as the contact with journal, informs all other co-authors of all changes and suggestions from the editorial staff, and does not make decisions regarding the article alone without the written consent of all co-authors.
9. The author properly corresponds with the reviewer through contact with the editor and responds to comments and observations if they arise.
10. If necessary, the authors either adjust the data presented in the article, or refute them.

### **Responsibility of the editors of the journal «Nanotechnologies in construction»**

1. The editors are personally and independently responsible for the content of the materials published and recognize that responsibility. The reliability of the work in question and its scientific significance should always be the basis in the decision to publish.
2. The editors of the journal can check the materials with anti-plagiarism system «Antiplagiat» detecting borrowed fragments to provide copyright protection.
3. The editors make fair and objective decisions, regardless of any commercial considerations and provide a fair and efficient process for the independent review.
4. The editors evaluate manuscripts' intellectual content without regard to race, gender, sexual orientation, religion, origin, nationality, and/or the political preferences of the authors.
5. The editors do not work with articles for which they have a conflict of interest.
6. The editors resolve conflict situations arising during the editorial process, as well as use all available means to resolve these situations.
7. The editors of the journal publish information concerning corrections, rebuttals, and review articles in case the need arises.
8. The editors of the journal do not publish the final version of the article without the consent of the authors.



### **The responsibility of the reviewers of the journal «Nanotechnologies in construction»**

1. The reviewer evaluates his or her own availability before the examination of the manuscript and accepts materials for review only if the reviewer is able to allow for sufficient time as to ensure the quality his or her work.
2. The reviewer must use the form created by the editors and delivered with paper. The reviewer may give extended review.
3. The reviewer notifies the editorial staff of any conflict of interest (if one exists) before the start of the review of the paper.  
In the case of the absence of any competing interests the reviewer should claim that by writing «The reviewer declares the absence of any competing interests» in the review.
4. The reviewer does not send information about the article and or any of the data contained within the article to any third party.
5. The reviewer does not use the information obtained from the article for any personal and or commercial purposes.
6. The reviewer does not make conclusions about the quality of the article on the basis of subjective data, e.g. the personal relationship to the author, gender, age, religion, etc.
7. The reviewer uses only proper and appropriate language and explanations in respect to the articles, avoiding any personal remarks.

### **The responsibility of the publisher of the journal «Nanotechnologies in construction»**

1. The publisher not only supports scientific communication and invests in the process, but is also responsible for complying with all current guidelines and standards for publishing scientific work.
2. The publisher does not affect the editorial policy of the journal.
3. The publisher provides legal support to the journal if necessary.
4. The publisher provides for the timely release of futures issues of the journal.
5. The publisher publishes changes, explanations, and recalls articles that have been identified to contain scientific misconduct and or critical errors.

### **The responsibility of the editor-in-chief of the journal «Nanotechnologies in construction»**

1. The editor-in-chief is responsible for making a decision which of submitted papers are to be published in the journal. This decision always must be based on the examination of paper reliability and its importance for scientists and readers. The editor-in-chief may be guided by methodical recommendation elaborated by the editorial board of the journal. He also may take into account legal requirements, such as exclusion of libel, infringement of copyright and plagiarism. When making decision on the publication, the editor-in-chief may consult with the members of editorial board, reviewers.
2. The editor-in-chief evaluates submitted papers by the intellectual content, regardless of the race, sex, sexual preference, religion, ethnic origins, citizenship and political views of the author.
3. The editor-in-chief, editorial staff, members of the editorial board must not disclose information on the submitted manuscript to the third person except for the author, reviewers, potential reviewers, and the publisher.
4. The information contained in the submitted paper cannot be used in the paper of the editor-in-chief, members of the editorial board without author's written permission. Confidential information or ideas obtained during review must be kept in secret and must not be used for self-profit.
5. The editor-in-chief should not review the paper if there is a conflict of the interests evolving from competition, co-operation or other relations with someone from the authors, companies and organizations which are related to the paper.
6. The editor-in-chief should ask all authors to present information on the certain competitive interests and publish corrections if the conflict of the interests has been revealed after the publication. If necessary another appropriate action such as publication of disproof or expression of a concern can be performed.
7. The editor-in-chief should take reasoned and prompt measures if he gets complaints of ethnic character in respect to the submitted manuscript or issued paper, contacting with the editors and publisher.

### **Complaints and appeals handling**

In the case of incoming complaints and appeals a commission is formed. The commission can consist of the publisher, the editor-in-chief, deputy editor-in-chief, members of editorial council, authors and specialists which are competent in the considering subjects.

An investigation is held and the results of it are reported to all interested parties. According to laws, if it is necessary, the materials are delivered to competent state bodies.



### **Policy of disclosure and conflicts of interest /competing interests**

Unpublished data from manuscripts submitted for consideration can not be used for personal research without the expressed written consent of the author.

Information or ideas obtained through peer review and related activities, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

### **The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility**

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

### **Ethical oversight of the published materials**

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

### **Derivation and plagiarism**

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

### **Intellectual property**

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

- support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
- cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

### **Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication**

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

### **Preprint and postprint policy**

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.



#### **On the procedure in case of abusive practice (infringement)**

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике ([Committee on Publication Ethics](#)), Великобритании, [издательства Elsevier](#) (Нидерланды) и других зарубежных редакторских ассоциаций и информационных систем, а также [Декларация «Этические принципы научных публикаций»](#), принятая Ассоциацией научных редакторов и издателей (Россия).

### Ответственность авторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Автор отправляет на рассмотрение статью, материалы которой ранее не были опубликованы. Если статья основана на ранее опубликованных материалах не статейного характера или материалы представлены в Интернете, следует уведомить об этом редакцию журнала.
2. Автор не отправляет на рассмотрение одну статью в разные журналы.
3. Все соавторы согласны на представление статьи в журнал.
4. Автор уведомляет редакцию о потенциальном конфликте интересов. Об отсутствии конфликта интересов автор указывает в статье – «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».
5. Автор предпринимает необходимые меры, чтобы убедиться в корректности представленных в статье цитирований.
6. В список авторов включаются только лица, внесшие значительный вклад в проведение исследования.
7. Автор корректно цитирует свои предыдущие работы и избегает самоплагиата в рукописи и искусственно-го увеличения объема публикаций (salami-slicing).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

### Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самостоятельно и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе [Антиплагиат](#) по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторы.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.



#### **Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»**

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.
2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.
3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.  
Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».
4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.
5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.
6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.
7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

#### **Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»**

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.
2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.
3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.
4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.
5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

#### **Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»**

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлекцией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлекции, рецензентами.
2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.
3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлекции не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.
4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлекции без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.
5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.
6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.
7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.



### Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и апелляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

### Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

### Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

### Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редколлегии, организовав немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

### Заемствования и плагиат

Редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы [Антиплагиат](#). В случае обнаружения многочисленных заимствований редакция действует в соответствии с правилами [COPE](#).

### Интеллектуальная собственность

Редакторы должны внимательно относиться к вопросам, касающимся интеллектуальной собственности, и взаимодействовать с издателем при урегулировании случаев возможных нарушений законов и соглашений об охране интеллектуальной собственности.

Редакторы, кроме применения инструментов обнаружения плагиата, могут также:

- поддерживать авторов, чье авторское право было нарушено, или тех, кто стал жертвой плагиата;
- быть готовыми к совместной работе с издателем по защите авторских прав и к преследованию нарушителей (например, путём подачи запросов для отзыва статей или удаления материалов с веб-сайтов).

### Обсуждение работ, опубликованных в журнале. Исправления после публикаций

Редакторы должны быть открытыми для исследований, которые оспаривают предыдущие работы, опубликованные в журнале; поощрять и с готовностью рассматривать обоснованную критику работ, публикуемых в их журнале.



Авторы критикуемых материалов должны иметь возможность ответить на критику. Работы, сообщающие только об отрицательных результатах, также могут публиковаться.

#### **Политика размещения препринтов и постпринтов**

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке на опубликованную в журнале «Нанотехнологии в строительстве» статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

#### **О процедурах в случае злоупотреблений (нарушений)**

Издатель, главный редактор, каждый сотрудник редакции, член редакционной коллегии, автор, рецензент и читатель обязаны соблюдать этику научных публикаций в журнале действующих законов, правил или положений и обязуются сообщать о любых известных случаях уже совершенного или потенциального злоупотребления (нарушения).

Редакцией журнала незамедлительно проводится расследование по всем сообщениям о злоупотреблениях (нарушениях) и, если информация подтверждается, принимаются меры по устранению злоупотреблений (нарушений). Если это требуется в соответствии с законодательством, материалы передаются в соответствующие государственные органы.

На все претензии авторов редакция предоставляет развернутые и обоснованные ответы, прилагая все усилия для разрешения конфликтных ситуаций.



## AUTHOR GUIDELINES

### Admission of articles

#### The authors submit to the editors:

- electronic manuscript by e-mail: [info@nanobuild.ru](mailto:info@nanobuild.ru);
- accompanying letter (the editors send the sample of the letter to the authors on demand).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); agree to publish full texts (parts or metadata) of the paper in free access in Internet at the official website of the edition ([www.nanobuild.ru](http://www.nanobuild.ru)), citation systems (data bases). All that authors indicate in the cover letter. More details about the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) are available here <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

#### When submitting articles to the journal, it is presumed that:

- the work has not been previously published in any other journal;
- the article is not under consideration in any other journal;
- all co-authors consent to the publication of the article;
- there is implicit or explicit consent of the organization in which the study was conducted.

#### Information about the conflict of interest

The article should exclude any actual or potential conflict of interest. If there is no conflict of interest, you should write that «the author declares no conflict of interest.»

**When submitting a manuscript to the journal, authors should ensure** that the content of the paper corresponds the topic of the journal; the structure and the format of the paper meet the editorial requirements; all citations are properly formatted and the source of tables and figures are shown (unless otherwise indicated, it is assumed that the tables and figures created by the author).

#### Basic the sections of the journal:

- construction material science;
- the study of the properties of nanomaterials;
- the results of the specialists' and scientists' researches;
- manufacturing technology for building materials and products;
- international scientific and technical cooperation;
- overview of inventions in the field of nanotechnology;
- development of new materials;
- rational use of natural sources;
- efficient use of recycled resources;
- the application of nanotechnology and nanomaterials in construction;
- system solutions for technological problems;
- in related sectors;
- forums, exhibitions, conferences and events in the area of construction and nanoindustry.

**These are the topics of the papers published in the journal:** creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; cement and other binders with mineral and organic additives; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; modification of building materials with nanofibers; disperse composite materials with nanocoating; formation of nanostructure coatings by means of laser sputtering; technologies aimed at studying nanomaterial properties; the systems of teaching the fundamentals of nanotechnologies; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

**The journal can also publish:** original article, review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.



## The structure of the paper

### IN ENGLISH

NAME OF THE SECTION (In English)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In English)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

**Title** (In English)

**Authors' first name and last name** (In English)

place of employment of each author, city, country (In English)

(name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.)

\*Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID author:

first name and last name – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

**Abstract:** the source of information, which is independent on the paper and which allows Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In English):

**Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...**

**Keywords:** (In English)

**Acknowledgments:** (if available) (In English)

**For citation:** (In English)

### Example.

**For citation:** Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes: production technology and applications. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

**Text of the paper:** (In English, number of words 3000–6000)

#### • INTRODUCTION

#### • METHODS AND MATERIALS

#### • RESULTS

#### • DISCUSSION

#### • CONCLUSIONS

**References** (In English) (Vancouver Style)

**Information about the author (authors)** (In English)

– first name, last name (full);

– academic degree;

– name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.;

– address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);

– authors' e-mail address;

– Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).

E-mail address is given without word “e-mail” and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.

The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.



**Example.**

**Zhanna V. Pisarenko** – Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Contribution of the authors** (In English):

author's last name and initials; author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, all authors made equal contribution to preparation of the article, etc.).

**Example.**

**Marina S. Morozova** – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

**Elena V. Bokova** – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

**The authors declare no conflicts of interests.**

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

**IN RUSSIAN**

NAME OF THE SECTION (In Russian)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In Russian)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

**Title** (In Russian)

**Authors' first name and last name** (In Russian)

place of employment of each author, city, country (In Russian)

(name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.)

\* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID author:

first name and last name (In Russian) - <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

**Abstract:** the source of information, which is independent on the paper and which allows

Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In Russian):

**Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...**

**Keywords:** (In Russian)

**Acknowledgments:** (if available) (In Russian)

**For citation:** (In Russian)

**Example.**

**Для цитирования:** Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021



**Text of the paper:** (In Russian, number of words 3000–6000)

• **INTRODUCTION**

• **METHODS AND MATERIALS**

• **RESULTS**

• **DISCUSSION**

• **CONCLUSIONS**

**References** (In Russian) (Vancouver Style)

**Information about the author (authors)** (In Russian)

– first name, last name (full);

– academic degree;

– name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.;

– address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);

– authors' e-mail address;

– Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).

E-mail address is given without word "e-mail" and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.

The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.

*Example.*

**Писаренко Жанна Викторовна** – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Contribution of the authors** (In Russian):

author's last name and initials; author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, all authors made equal contribution to preparation of the article, etc.).

*Пример.*

**Морозова М.С.** – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Бокова Е.В.** – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

**The authors declare no conflicts of interests.** (In Russian)

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X. (In Russian)

## Manuscript text

### File format

The editors accept texts saved using Microsoft Word in .rtf format.

### Text layout

- Use the font Times New Roman, font size – 14 pt., and 1.5 line spacing;
- Do not use an underscore in the text (for subtitles – use bold, to highlight text – use italics);
- Non-Russian languages titles (journals, organizations, etc.) should be left in the original, enclosed in quotes.



### Abbreviations

All abbreviations should be defined when first used. If the article contains a large number of abbreviations, a list deciphering each of them can be included before the text of the article

### Tables and Figures

All tables and figures must be numbered and identified, they should be a reference in the text. The tables should not contain empty columns. Figures should be of good quality, suitable for printing. Figures should be submitted together with the article, with each figure submitted as an individual file.

One way to check the quality of the image, is to increase its size using any image manipulation software. A high quality image is not burred or distorted when enlarged.

### Footnotes

If necessary, use footnotes with continuous numbering (Arabic numerals) throughout the document. Footnotes can be quotes from the works mentioned in the text, for more information.

### Citations and bibliography

The journal requires the use of the Vancouver citation style (a reference in the text in square brackets, full bibliographic description of the source in the bibliography in the order mentioned in the text of the article).

### References

The list of references includes sources used in the text.

References accepted for publication but not yet published articles must be labeled with the words “in press”; authors should obtain written permission to refer to these documents and evidence that they are accepted for publication. Information from unpublished sources must be marked with the words “unpublished data / documents,” the authors must also receive written confirmation of the use of such materials. The journal adopted the Vancouver style of reference design and citation.

## Copyright Notice

Authors who publish in journal agree to the following:

1. Authors retain copyright of the work and provide the journal right of first publication of the work.
2. The authors retain the right to enter into certain contractual agreements relating to the non-exclusive distribution in the published version of the work here form (eg, post it to an institutional repository, the publication of the book), with reference to its original publication in this journal.
3. The authors have the right to post their work on the Internet (eg in the institute store or personal website) prior to and during the review process of its data log, as this may lead to a productive discussion and a large number of references to this work.

## Privacy Statement

Specified when registering the names and addresses will be used solely for technical purposes of a contact with the Author or reviewers (editors) when preparing the article for publication. Private data will not be shared with other individuals and organizations.



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

### Прием статей

#### Авторы представляют в редакцию:

- рукописи в электронном виде по e-mail: [info@nanobuild.ru](mailto:info@nanobuild.ru);
- сопроводительное письмо (редакция высылает авторам образец по их предварительному запросу).

Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); согласны с размещением в открытом доступе полных текстов статей (их составных частей или метаданных) в Интернете на сайте издания ([www.nanobuild.ru](http://www.nanobuild.ru)), в системах цитирования (базах данных). Об этом авторы указывают в сопроводительном письме. Подробно о лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) смотрите здесь <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>.

#### Представление статьи в журнал подразумевает, что:

- работа не была опубликована ранее в другом журнале;
- не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие – неявное или явное – организации, в которой исследование было проведено.

#### Информация о конфликте интересов

В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что «автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

**При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться**, что содержание статьи соответствует тематике журнала; структура статьи и оформление соответствуют требованиям редакции; все цитирования оформлены корректно, указаны источники для таблиц и рисунков (если не указано иное, предполагается, что таблицы и рисунки созданы автором).

#### Основные разделы журнала:

- строительное материаловедение;
- исследование свойств наноматериалов;
- результаты исследований ученых и специалистов;
- технологии производства строительных материалов и изделий;
- международное научно-техническое сотрудничество;
- обзор изобретений в области nanoиндустрии
- разработка новых материалов;
- рациональное использование природных ресурсов;
- эффективное использование вторичного сырья;
- применение нанотехнологий и наноматериалов в строительстве;
- системные решения технологических проблем;
- в смежных отраслях;
- форумы, выставки, конференции, мероприятия строительной отрасли и nanoиндустрии.

**В журнале публикуются работы по следующим темам:** создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с нанопокрывом; формирование наноструктурных покрытий лазерным напылением; системы преподавания основ нанотехнологий; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.



Журнал принимает к публикации: научные статьи, обзорные статьи, редакционные статьи, дискуссионные статьи, редакторские заметки, рецензии на книгу, рецензии на статью и т. п.

## Структура статьи (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021)

### НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (In English)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, paper reviews, etc.) (In English)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

### Заглавие статьи (In English)

**Имя Отчество** (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (In English)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.)

\* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

**Abstract:** независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (**Introduction, Methods and Materials, Results, Discussion, Conclusion**), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на английском языке):

**Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion...Conclusion...**

**Keywords:** (In English)

**Acknowledgments:** (при наличии) (In English)

**For citation:** (In English)

### Пример.

**For citation:** Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes. *Nanotechnologies in Construction*. 2021;13(4):213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

**Статья** ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):

• **INTRODUCTION**

• **METHODS AND MATERIALS**

• **RESULTS**

• **DISCUSSION**

• **CONCLUSION**

**References** (In English) (согласно Vancouver Style)

**Information about the author (authors)** (In English)

– имя, отчество, фамилия автора (полностью);

– ученое звание;

– ученая степень;

– наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.);

– адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);



- электронный адрес автора (e-mail);
- открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

**Пример.**

**Zhanna V. Pisarenko** – Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Contribution of the authors** (In English):

имя, первая буква отчества и фамилия автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

**Пример.**

**Marina S. Morozova** – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

**Elena V. Bokova** – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

**The authors declare no conflicts of interests.**

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

**НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ**

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (на русском языке)

Научная статья (обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью и т. п.) (на русском языке)

УДК XXX

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

**Заглавие статьи** (на русском языке)

**Имя Отчество** (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (на русском языке)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (на русском языке)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.)

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

**Аннотация** (или **Резюме**): независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (введение, методы и материалы, результаты, обсуждение, заключение (выводы)), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на русском языке):

**Аннотация** (или **Резюме**): **Введение... Методы и материалы... Результаты... Обсуждение... Заключение (выводы)...**

**Ключевые слова:** (на русском языке)



**Благодарности:** (при наличии) (на русском языке)

**Для цитирования:** (на русском языке)

**Пример.**

**Для цитирования:** Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© авторы, 2021

**Статья** (на русском языке, объем – 3–6 тыс. слов):

- Введение
- Методы и материалы
- Результаты
- Обсуждение
- Заключение (выводы)

**Список источников** (на языке оригинала статьи – русском или английском)

**Информация об авторе (-ах)** (на русском языке)

- фамилия имя отчество автора (полностью);
- ученое звание;
- ученая степень;
- наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
- адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
- электронный адрес автора (e-mail); – открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

**Пример.**

**Писаренко Жанна Викторовна** – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия, [z.pisarenko@spbu.ru](mailto:z.pisarenko@spbu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Вклад авторов** (на русском языке):

- фамилия инициалы автора;
- в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

**Пример.**

**Морозова М.С.** – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Бокова Е.В.** – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Статья поступила в редакцию XX.XX.202X; одобрена после рецензирования XX.XX.202X; принята к публикации XX.XX.202X.



## Оформление текста рукописи

### Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе Microsoft Word в формате .rtf.

### Оформление

- используйте шрифт 14 Times New Roman и интервал 1,5 строки;
- не используйте подчеркивание внутри текста (для подзаголовков используйте полужирное начертание, для выделения в тексте – курсив);
- иностранные названия (журналов, организаций и т.д.) следует оставлять в оригинале, заключать в кавычки.

### Аббревиатуры

Все аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если аббревиатур много, можно сделать список с расшифровкой каждой из них перед текстом статьи.

### Таблицы и рисунки

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и названы, на них должна быть отсылка в тексте статьи. В таблицах не должно быть пустых граф. Рисунки должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Прикладываются к статье отдельными файлами.

Чтобы проверить качество изображения, можно увеличить его. Хорошее изображение не размывается при увеличении.

### Сноски

При необходимости используются сноски со сквозной нумерацией (арабские цифры) по всему документу. В сносках могут быть цитаты из работ, которые упоминаются в тексте, дополнительная информация.

### Оформление цитат и списка литературы

В журнале принят Ванкуверский стиль цитирования (отсылка в тексте в квадратных скобках, полное библиографическое описание источника в списке литературы в порядке упоминания в тексте статьи).

### Список источников

В список литературы включаются источники, используемые в тексте статьи. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

Оформление ссылок на источники, библиографических ссылок осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021.

## Авторские права

Авторы, публикующиеся в журнале, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.
3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или на персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большому количеству ссылок на данную работу.

## Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.