ISSN 2075-8545 (online)
ASI • CA(pt) • CrossRef • CNKI • DOAJ • EBSCO Publishing • ESCI Web of Science • EZB • eLIBRARY.RU • Google Scholar • HEAL Link
ICI Journals Master List • OAJI • ProQuest • Readera • ResearchBib • ResearchGate • Scopus • Ulrich's Periodicals Directory

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE
A Scientific Internet-Journal
2024 • Tom 16 • No. 3

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
научный Интернет-журнал
2024 • Том 16 • № 3

IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Structure formation of lime composites with polysaccharide additives
- The effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material
- Study of CO_2 influence on the formation of nanoscale structure and physical and mechanical properties of concrete
- The effectiveness of using fibre-reinforced concrete in underground construction: experience and prospects

- Структурообразование известковых композитов с добавками полисахаридов
- Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала
- Исследование влияния CO_2 на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона
- Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы

www.nanobuild.ru e-mail: 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
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE
НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

ISSN 2075-8545 (online)

«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 ofInformatics 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., Asssociate 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 № 3 (Vol. 16) is 20.06.2024

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: A Scientific Internet-Journal 2024 • Vol. 16 • No. 3

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION 208

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Loganina V.I., Garkina I.A., Tkach E. V., Stepina I. V.
Structure formation of lime composites with polysaccharide additives 211

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Vikhareva I.N., Antipin V.E.
Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part III 218

Morozova M.V.
The effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material 227

Rakhmatullina R.G., Njiya N., Rusinov A.A., Maskova A.R.
Study of thermal effect based on liquid crystal nanoparticles 235

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION

Wuhan University of Technology 248

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES

Zalyatdinov A.A., Kamenov R.U., Rechenko D.S.
Study of CO_2 influence on the formation of nanoscale structure and physical and mechanical properties of concrete 249

Lu Y., Ivanov L.A., Wang F., Pisarenko Zh.V., Ye C.
Management analytics: a bibliometric analysis 257

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

Trifanichev V.M., Tudvachev A.V., Guzov Ya.Yu., Guzov Yu.N., Polyakov N.A.
Technologies of small innovative enterprises as a result of intellectual activity: application of nanotechnologies in the liquidation of orphan wells 267

Rusanov V.E., Maslov P.S., Alekseev V.A.
The effectiveness of using fibre-reinforced concrete in underground construction: experience and prospects 276

PUBLISHING ETHICS 288

AUTHOR GUIDELINES 292

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 наноиндустрии 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 наноиндустрии.

Р Е Д А К Ц И Я

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 № 3, Том 16, 2024: 20.06.2024 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

РОССИЙСКОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

МЕЖДУНАРОДНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)

ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: научный Интернет-журнал 2024 • Том 16 • № 3

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 208

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В.
Структурообразование известковых композитов с добавками полисахаридов 211

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Вихарева И.Н., Антипин В.Е.
Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть III 218

Морозова М.В.
Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала 227

Рахматуллина Р.Г., Нжийа Н., Русинов А.А., Маскова А.Р.
Исследование теплового эффекта на основе наночастиц жидких кристаллов 235

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уханьский технологический университет 243

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Залятдинов А.А., Каменов Р.У., Реченко Д.С.
Исследование влияния CO_2 на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона 249

Лу Я., Иванов Л.А., Ван Ф., Писаренко Ж.В., Йе Ч.
Управленческая аналитика: библиометрический анализ 257

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Трифаничев В.М., Тудвачёв А.В., Гузов Я.Ю., Гузов Ю.Н., Поляков Н.А.
Технологии малых инновационных предприятий как результат интеллектуальной деятельности: применение нанотехнологий при ликвидации бесхозных скважин 267

Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А.
Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы 276

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 288

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 292

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Review article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-211-217

CC BY 4.0

Structure formation of lime composites with polysaccharide additives

Valentina I. Loganina[1]*, Irina A. Garkina[1], Evgenia V.Tkach[2], Irina V. Stepina[2]

[1] Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: loganin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The research is aimed at obtaining a lime composition and coating based on it for the restoration of cultural heritage sites. **Materials and methods.** We used for study slaked lime (fluff) with an activity of 83%. Sunbo PC 1021 (a superplasticizer based on polycarboxylate ether), MasterGlenium 115 and Sika ViscoCrete-226 P were used as plasticizing additives. The cohesive strength of the coatings was determined by the axial tensile strength. Rheological properties were assessed by plastic strength, which was determined using a KP-3 conical plastometer. **Results and discussions.** It was revealed that the introduction of polysaccharide additives contributes to a sharp increase in plastic strength compared to the control composition. The additive Sika ViscoCrete-226 P has the greatest plasticizing effect. It was revealed that the qualitative mineralogical composition of lime composites is the same. However, analysis of X-ray diffraction patterns indicates an increase in the intensity of $CaCO_3$ reflections, which indicates an increase in the carbonization front. Control samples contain higher amounts of portlandite. A slight increase in the width of the $CaCO_3$ peaks is observed, which indicates the possible introduction of organic molecules into the calcite composition. A change in the parameters of the crystal lattice was established in samples prepared with slaked lime in the presence of polysaccharides. **Conclusion.** The absence of chemical interaction between lime and polysaccharides has been established. It has been shown that coatings based on lime compositions with the addition of polysaccharides are characterized by higher cohesive strength. A change in the parameters of the crystal lattice was established in samples prepared with slaked lime in the presence of polysaccharides.

KEYWORDS: lime binder, polysaccharides, structure formation, plastic strength, cohesive strength.

ACKNOWLEDGEMENTS: The work was carried out within the framework of a grant from the Industry Consortium "Construction and Architecture" for fundamental and applied scientific research (agreement No. PGUAS/K-24).

FOR CITATION:
Loganina V.I., Garkina I.A., Tkach E. V., Stepina I. V. Structure formation of lime composites with polysaccharide additives. *Nanotechnologies in construction.* 2024; 16(3): 211–217. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-211-217. – EDN: DDCSZB.

INTRODUCTION

Lime compositions are widely used for the restoration of cultural heritage sites [1, 2]. To increase the durability of coatings based on lime finishing compositions, various modifying additives are introduced into their formulation. To increase the durability of lime coatings, works [3] proposed introducing synthesized hydrosilicates (HSS), silicic acid sol [4–7], synthesized hydroaluminosilicates [8], and organomineral additives [9, 10] into the formulation. To restore historical masonry, it is proposed in [11–14] to use lime compositions, the formulation of which includes metakaolinite. Of interest is the use of polysilicate mortar in lime compositions for restoration and finishing of building walls. Polysilicates are a dispersion of colloidal silica in an aqueous solution of alkali metal silicates. Studies have shown the effectiveness of using polysilicate mortar in lime compositions as a modifying additive [15, 16].

In [17, 18], a proposal was made to use lime compositions in the formulation of which organic components (polysaccharides, proteins and fatty acids) are introduced

© Loganina V.I., Garkina I.A., Tkach E. V., Stepina I. V., 2024

as part of the implementation of restoration projects. The authors determined that the introduction of animal glue as an additive increases the mechanical strength of the solution by 2 times, increases the carbonization front by 2 times, and reduces porosity and pore size. In the Old World, plant extracts, glutinous rice, fruit juices, oils, and animal fats were added to slaked lime to improve the properties of lime mortars and plasters [19–20]. For example, in his book De Architectura, Vitruvius indicated that oil (Oleo subacta) should be added to lime to make the mortar waterproof. In the Americas, there is ample ethnohistorical, archaeological and analytical evidence for the use of plant extracts by the ancient Maya stonemasons.

Despite a significant amount of research devoted to methods for increasing the durability of lime composites, many issues of ensuring their durability, especially during the restoration of cultural heritage sites, remain unsolved. It is of interest when developing a formulation for a lime composition to use a biomimetic method, which consists in obtaining a lime composite with meso-nanostructural characteristics corresponding to calcite biominerals. This will significantly increase the operational durability of the restoration material.

MATERIALS AND METHODS

The work used slaked lime (fluff) with a true density of 2230 kg/m^3, bulk density of 280 kg/m^3, activity of 83%, with a specific surface area Ssp of 559 m^2/kg.

Water-soluble modified polysaccharides Atren Cem LV and Atren Cem NV (TU 2458-062-63121839-2014) were used as an organic additive.

The additives used as plasticizing additives were RS 1021 (superplasticizer based on polycarboxylate ether), MasterGlenium 115 and Sika ViscoCrete-226 P. The amount of plasticizer was 1% by weight of lime. The water-lime ratio W/L in all compositions was W/L = 1.0. Additives were introduced along with the mixing water.

The cohesive strength of the coatings was determined by the axial tensile strength on samples measuring 10×10×50 mm and calculated using the formula

$$R_p = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

where P is taken to be the destructive force, N; F is cross-sectional area of the sample before testing, m^2.

Rheological properties were assessed by plastic strength, which was determined using a KP-3 conical plastometer.

Studies of the mineralogical composition were carried out using a D8Advans powder diffractometer (Germany), (CuKα radiation, sample rotation, continuous (1 deg/min), step-by-step (0.02° step, 10 s exposure) modes in the angle range 2Θ = 5°–100°) [17]. When identifying phases, we used the ICDD PDF2 and Crystallography Open Database1

RESULTS

It has been established that the introduction of the addition of Atren Cem LV and Atren Cem HV polysaccharides contributes to a sharp increase in plastic strength compared to the control composition by 1.5 times at the time of mixing. The introduction of Sunbo PC 1021 plasticizer into the lime mixture helps reduce plastic strength. At the time of mixing, the plastic strength of the control composition was 105 kPa, and with the addition of Atren Cem LV and the plasticizer Sunbo PC 1021 – 58 kPa. The plasticizing effect of the Sika ViscoCrete-226 P additive at the initial moment of hardening is the same as the effect of the Sunbo PC 1021 additive, however, after 8 hours of hardening, the plasticizing effect of the Sunbo PC 1021 additive decreases, the plastic strength of the composition becomes equal to the composition with the MasterClenium 115 additive, while compositions with with the addition of Sika ViscoCrete-226 P they retain a low plastic strength of 85 kPa (Table 1).

Table 1
Plastic strength of lime composition with the addition of polysaccharides Atren Cem LV

Compound	Plastic strength value, kPa
Lime+water, W/L = 1.0	105
composition with the addition of Atren Cem LV 1% by weight of lime, W/L = 1.0	149
composition with the addition of Atren Cem LV and plasticizer Sunbo RS 1021, W/L = 1.0	58
composition with the addition of Atren Cem LV and plasticizer MasterClenium 115, W/L = 1.0	76
состав с добавкой Atren Cem LV и пластификатором Sika ViscoCrete-226 P, W/L = 1,0 composition with the addition of Atren Cem LV and plasticizer Sika ViscoCrete-226 P, W/L = 1.0	56

In Fig. 1–3 show diffraction patterns of the samples – control and with the additive. Analysis of the data given in Table 2 indicates that the qualitative mineralogical composition is the same. However, analysis of diffraction patterns indicates an increase in the intensity of $CaCO_3$ reflections, which indicates an increase in the carboniza-

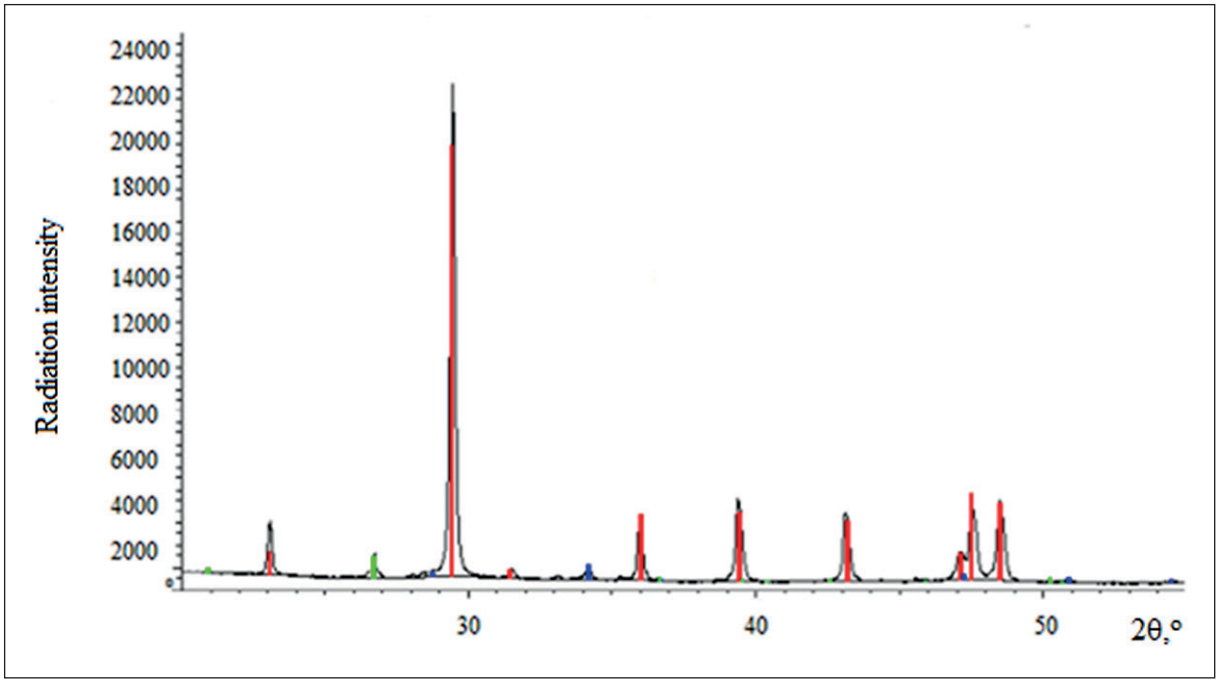

Fig. 1. **X-ray diffraction pattern of lime composite (control composition)**

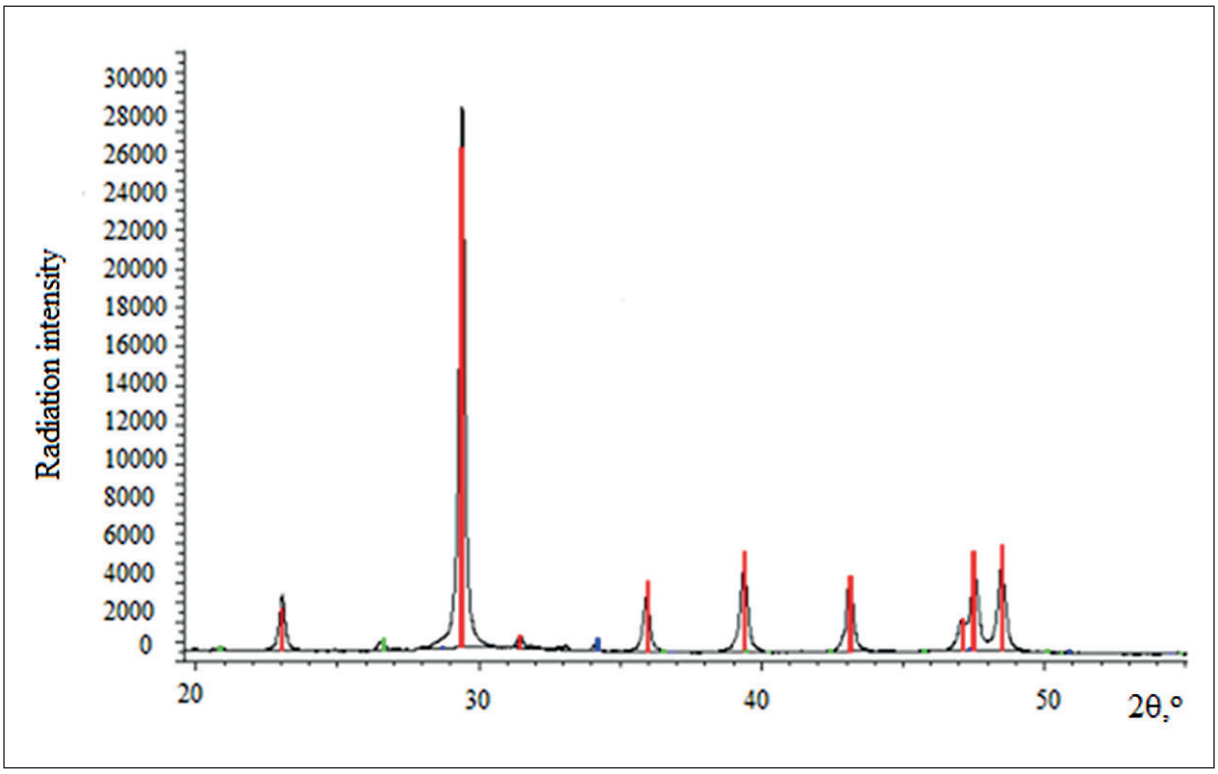

Fig. 2. **X-ray diffraction pattern of lime composite (with the addition of Atren Cem HV polysaccharide)**

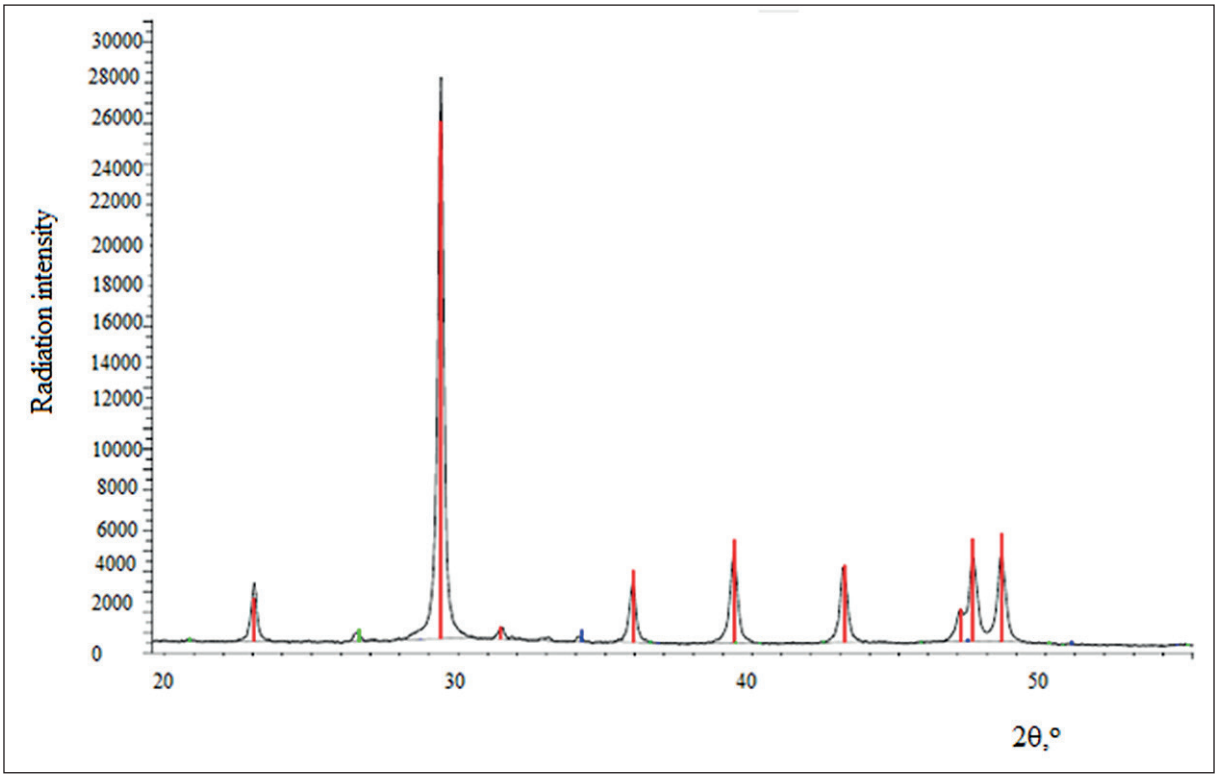

Fig. 3. **X-ray diffraction pattern of a lime composite (lime slaked in the presence of the addition of Atren Cem HV polysaccharide)**

Table 2
Mineral content of lime composites

Compound	Mineral content(peak intensity ratio)		
	$CaCO_3$(I/Ic)	$Ca(OH)_2$(I/Ic)	SiO_2(I/Ic)
control	87.4064% (3.74)	3.1247% (3.530)	4.1834% (4.810)
Slaked in the presence of an additive	92.2662% (3.490)	2.1550% (3.840)	2.1778% (4.520)
With additive	88.8736% (3.74)	2.9287% (3.840)	2.9404%(4.810)
Crystal lattice parameters			
	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	SiO_2
control			
a	4.98700	3.58440	4.90000
c	17.05800	4.89620	5.40000
Slaked in the presence of an additive			
a	4.99100	3.58620	4.91580
c	17.06200	4.88010	5.40910
With additive			
a	4.98700	3.58620	4.91000
c	17.05800	4.88010	5.40000

tion front. The control samples contain a larger amount of portlandite, amounting to 3.1247%. In samples prepared with lime slaked in the presence of an additive, the content of portlandite is only 2.155% and in samples prepared with an additive – 2.9404%. Obviously, due to the water-retaining effect of the additive, more favorable conditions are created for the carbonization of lime. The amount of calcite in control samples is 87.4%, in samples prepared with slaked lime in the presence of an additive – 92.266% and in samples prepared with an additive – 88.87%.

Due to the amorphous structure, organic substances are not identified on the x-ray diffraction pattern.

A slight increase in the width of the $CaCO_3$ peaks is observed, which indicates the possible introduction of organic molecules into the calcite composition. A change in the parameters of the crystal lattice was established in the samples, especially those prepared with lime slaked in the presence of polysaccharides. Samples of limestone based on lime, slaked in the presence of polysaccharides, demonstrate higher crystal lattice parameters c and a compared to calcite of the control composition (Fig. 1–3, and Table 2). This indicates the presence of organics in the form of intracrystalline occlusions in the sample.

Additionally, IR transmission spectra of the samples under study were obtained (Fig. 4) using an FSM 1201 IR Fourier spectrometer (Infraspek LLC, Russia). The samples were prepared in the form of tablets pressed with potassium bromide at a mass ratio of x:10x, where x is the mass of the initial sample, 10x is the mass of KBr. The samples were not degassed during the pressing process. Measurements were carried out in the spectral range 450–4050 cm^{-1} with a spectral resolution of 4 cm^{-1}. For ease of perception, the IR spectra were normalized and additively shifted relative to the zero point along the ordinate axis.

Analysis of the IR spectra presented in Fig. 4 shows that the studied samples 2 and 3 are characterized by the presence of a significant number of absorption modes corresponding to their expected chemical composition – $Ca(OH)_2 + CaCO_3$. The infrared absorption spectra with maxima at 1424 cm^{-1} are due to the CO_3 group in calcite crystals. There is also an intense narrow absorption band in the region of 876 cm^{-1}, characteristic of calcite. The higher intensity of the peak in the region of 876 cm^{-1} indicates a higher content of calcite in the sample with the addition of Atren Cem HV. Obviously, due to the water-holding capacity of polysaccharides, more favorable conditions are created for the carbonization of lime.

Analysis of the IR spectra shows that sample 3 is characterized by the presence of a number of absorption modes corresponding to organic components, as evidenced by the C–H stretching vibration bands at 2970 and 2870 cm^{-1}.

The pronounced intensity of the absorption band with a maximum of 1650 cm^{-1}, corresponding to the deformation vibrations of H–O–H, indicates the presence of water in an unbound form in the water-soluble modified polysaccharide Atren Cem HV (sample No. 1) and in the control sample (without additive) (sample No. 2). The introduction of the Atren Cem HV additive (sample No. 3) does not lead to the emergence of new vibrational

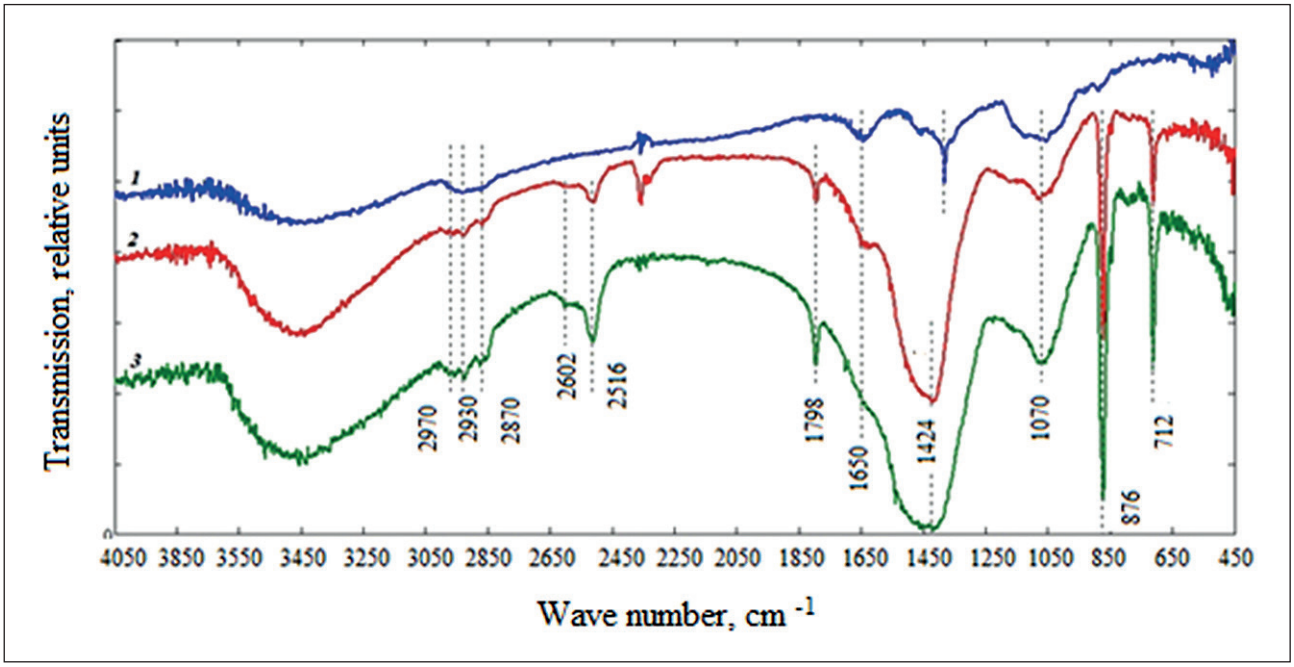

Fig. 4. **IR transmission spectra of the studied samples:** 1 – water-soluble modified polysaccharide Atren Cem HV; 2 – control composition; 3 – composition with the addition of polysaccharide Atren Cem HV

Table 3
Tensile Strength of Lime Specimens

Compound	Tensile strength, MPa
Curing age 28 days	
Control (lime+water)	0,22
Composition with the addition of Atren Cem LV in an amount of 1% by weight of lime	0,24
Curing age 3 months	
Control (lime+water)	0,264
Composition with the addition of Atren Cem LV in an amount of 1% by weight of lime	0,47
Composition with the addition of Atren Cem LV in an amount of 0.5% by weight of lime	0,379

modes or a noticeable shift in the absorption maximum of those already present, which suggests the absence of their chemical interaction. An interesting feature of sample No. 3 is the almost complete disappearance of the absorption peak at 1650 cm^{-1} and a noticeable increase in the intensity of the absorption band 3100–3650 cm^{-1}, corresponding to the symmetrical stretching vibrations of OH groups and Ca–OH. This feature, apparently, may indicate that the introduction of a polysaccharide additive into slaked lime helps to reduce the concentration of free water in the material.

The results of assessing the cohesive strength of coatings are given in Table 3.

The results obtained indicate that lime compositions with the addition of Atren Cem LV polysaccharides are characterized by higher cohesive strength. As the age of hardening increases, the increase in cohesive strength of samples with the addition of synthetic polysaccharide Atren Cem LV is more pronounced. Thus, at the age of 28 days of hardening, the cohesive strength of samples based on the control composition is R 0.22 MPa, and with the addition of a polysaccharide – 0.24 MPa. At the age of 3 months of hardening, the differences in the values of cohesive strength are more pronounced. The cohesive strength of control samples is 0.264 MPa, and of samples with the addition of Atren Cem LV in an amount of 1% by weight of lime – 0.47 MPa, with the addition of Atren Cem LV in an amount of 0.5% by weight of lime – 0.379 MPa.

CONCLUSION

The results of the studies indicate the absence of chemical interaction between lime and polysaccharides. It has been shown that lime compositions with the addition of polysaccharides are characterized by higher cohesive strength due to the high content of calcite. A change in the parameters of the crystal lattice was established in samples prepared with slaked lime in the presence of polysaccharides. Samples of limestone based on lime slaked in the presence of polysaccharides demonstrate higher crystal lattice parameters compared to calcite of the control composition, which indicates the presence of organics in the form of intracrystalline occlusions in the sample.

REFERENCES

1. Zapevalova M.V. Review of the dry building mixtures market. *Construction materials and services: Electronic Scientific journal*. 2022; 6. http://www.vashdom.ru/articles/strm5.htm. (access date 2022.06)

2.Bokan Bosiljkov, V. *The use of industrial and traditional limes for lime mortars*. In: Lourenco, P.B., Roca, P. (Eds.), Historical Constructions. University of Minho, Guimaraes: 2001; 343–352.

3. Loganina V.I., Frolov M.V. Fine filler based on calcium silicates for lime mixtures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 5(52): 144-147.

4. Loganina V., Davydova O., Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A., Sabitov L., Nabiullina K. Improving the durability of lime finishing mortars by modifying them with silicic acid sol. *Materials*. 2022; 15: 2360. https://doi.org/10.3390/ma15072360

5. Loganina V.I., Davydova O.A., Simonov E.E. Study of the patterns of influence of silicic acid sol on the structure and properties of diatomite. *Construction Materials*. 2011; 12: 62-65.

6. Komokhov P.G. Sol-gel as a concept of cement composite nanotechnology. Construction Materials. 2006; 9: 14-15.

7. Komokhov P.G. Nanotechnology of radiation-resistant concrete. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2006; 5:22-23.

8. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Makarova L.V., Sadovnikova M.A. Rheological properties of composite lime binder using synthetic zeolites. *News of higher educational institutions. Construction*. 2013; 4 (652): 37-42.

9. Loganina V.I., Petukhova N.A., Gorbunov V.N., Dmitrieva T.N. Prospects for the production of organo-mineral additives based on domestic raw materials. *News of higher educational institutions. Construction*. 2009; 9 (609): 36-39.

10. Loganina V.I., Petukhova N.A., Akzhigitova E.R. Development of organomineral additives for dry construction mixtures. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2011; 3: 8-12.

11. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2006; 84 (1): 157–163.

12. Bakolas A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, A.Moropoulou. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2008; 92 (1): 34–351.

13. Cabrera J. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system / J.Cabrera, M.Frias. *Cement and Concrete Research*. 2001; 31 (2): 177–182.

14. Cachim P. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions / P.Cachim, A. Velosa, F.Rocha. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 71–78.

15. Krasinikova N.M. The influence of polysilicate on the structure formation of cement stone / N.M. Krasinikova, Z.F. Iksanova. *News of KGASU*. 2019; 4: 347–352.

16. Loganina V.I. Compositions for Limestone Restoration / V.I. Loganina, M.V. Zaytseva. *Key Engineering Materials*. 2022; 909: 177-183.

17. Degryse P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(1457): 63.

18. Genestar C. Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization / C. Genestar, C.Pons. *Journal of Cultural Heritage*. 2002; 4: 291–298.

19. Littmann E.R. Ancient Mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: The use of bark extracts in lime plasters. *Am. Antiquity*.1960; 25:593–597.

20. Magaloni D., Pancella R., Fruh Y., Cañetas J., Castaño V. Studies on the Mayan mortars technique. *MRS Online Proc. Lib*. 1995; 352: 483.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentina I. Loganina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department Quality Management and Construction Technology, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, loganin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7532-0074

Irina A. Garkina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mathematics and Mathematical Modeling, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, i.a.naum@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3371-3579

Evgenia V. Tkach – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, ev_tkach@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2132-4971

Irina V. Stepina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, sudeykina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5358-2935

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valentina I. Loganina – scientific guidance, preparation of samples, determination of specific surface area, collection, analysis and processing of results, interpretation of X-ray images, writing an article.

Irina A. Garkina – production of samples, determination of plastic strength.

Evgenia V. Tkach – conducting and interpreting IR spectroscopy.

Irina V. Stepina – literature review.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 26.04.2024; approved after reviewing 25.05.2024; accepted for publication 03.06.2024.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Обзорная статья
УДК 691.534
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-211-217

CC BY 4.0

Структурообразование известковых композитов с добавками полисахаридов

Валентина Ивановна Логанина[1]*, Ирина Александровна Гарькина[1], Евгения Владимировна Ткач[2], Ирина Васильевна Степина[2]

[1] Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, Пенза, Россия
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: loganin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на получение известкового состава и покрытия на его основе для реставрации объектов культурного наследия. **Материалы и методы.** В работе применяли гашеную известь (пушонка) активностью 83%. В качестве пластифицирующих добавок применяли добавки Sunbo PC 1021 (суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира), MasterGlenium 115 и Sika ViscoCrete-226 P. Когезионную прочность покрытий определяли по показателю прочности на осевое растяжение. Реологические свойства оценивали по показателю пластической прочности, которую определяли с помощью конического пластометра КП-3. **Результаты и обсуждения.** Выявлено, что введение добавки полисахаридов способствует резкому повышению пластической прочности по сравнению с контрольным составом. Наибольшим пластифицирующим эффектом обладает добавка Sika ViscoCrete-226 P. Выявлено, что качественный минералогический состав известковых композитов одинаковый. Однако анализ рентгенограмм свидетельствует об увеличении интенсивности отражений $CaCO_3$, что свидетельствует об увеличении фронта карбонизации. В контрольных образцах содержится большее количество портландита. Наблюдается некоторое увеличение ширины пиков $CaCO_3$, что свидетельствует о возможном внедрении органических молекул в состав кальцита. Установлено изменение параметров кристаллической решетки в образцах, приготовленных на извести, гашенной в присутствии полисахаридов. **Выводы.** Установлено отсутствие химического взаимодействия между известью и полисахаридами. Показано, что покрытия на основе известковых составов с добавкой полисахаридов характеризуются более высокой когезионной прочностью. Установлено изменение параметров кристаллической решетки в образцах, приготовленных на извести, гашенной в присутствии полисахаридов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: известковое вяжущее, полисахариды, структурообразование, пластическая прочность, когезионная прочность.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнялась в рамках выполнения гранта Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (договор № ПГУАС/К-24).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В. Структурообразование известковых композитов с добавками полисахаридов // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т.16, №3. С. 211–217. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-211-217. – EDN: DDCSZB.

ВВЕДЕНИЕ

Для реставрации широкое применение находят известковые составы [1, 2]. Для повышения стойкости покрытий на основе известковых отделочных составов в их рецептуру вводят различные модифицирующие добавки. Для повышения стойкости известковых покрытий в работах [3] предложено вводить в рецептуру синтезированные гидросиликаты (ГСК), золь кремниевой кислоты [4–7], синтезированные гидроалюмосиликаты [8], органоминеральные добавки [9, 10]. Для восстановления исторических кладок в [11–14] предлагается использовать известковое составы, в рецептуру которых введен метакаолинит. Представляет интерес применение в известковых составах для реставрации и отделки стен зданий полисиликатного раствора. Полисиликаты представляют собой дисперсию коллоидного

© Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В., 2024

кремнезема в водном растворе силикатов щелочных металлов. Проведенные исследования показали эффективность применения полисиликатного раствора в известковых композициях в качестве модифицирующей добавки [15, 16].

В работе [17, 18] внесено предложение в рамках реализации реставрационных проектов использовать известковые составы, в рецептуру которых вводятся органические компоненты (полисахариды, белки и жирные кислоты). Авторами определено, что введение животного клея в качестве добавки повышает механическую прочность раствора в 2 раза, увеличивает в 2 раза фронт карбонизации, уменьшает пористость и размер пор. В Старом Свете растительные экстракты, клейкий рис, фруктовые соки, масла, животные жиры добавляли в гашеную известь для улучшения свойств известковых растворов и штукатурок [19–20]. Например, в своей книге «De Architectura» Витрувий указал, что масло (Oleo subacta) следует добавлять в известь, чтобы сделать известковый раствор водонепроницаемым. В Америке имеется достаточно этноисторических, археологических и аналитических свидетельств использования экстрактов растений древними каменщиками майя.

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных методам повышения стойкости известковых композитов, многие вопросы обеспечения их стойкости, особенно при реставрации объектов культурного наследия, остаются нераскрытыми. Представляет интерес при разработке рецептуры известкового состава применение биомиметического способа, заключающегося в получении известкового композита с мезо-наноструктурными характеристиками, соответствующими кальцитовым биоминералам. Это позволит значительно повысить эксплуатационную стойкость реставрационного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе применяли гашеную известь (пушонка) истинной плотностью 2230 кг/м^3, насыпной плотностью 280 кг/м^3, активностью 83%, с удельной поверхностью $S_{уд}$ 559 м^2/кг.

В качестве органической добавки применяли водорастворимые модифицированные полисахариды Atren Cem LV и Atren Cem HV (ТУ 2458-062-63121839-2014).

В качестве пластифицирующих добавок применяли добавки Sunbo PC 1021(суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира), MasterGlenium 115 и Sika ViscoCrete-226 P. Количество пластификатора составляло 1% от массы извести. Водоизвестковое отношение В/И во всех составах составляло В/И = 1,0. Добавки вводились вместе с водой затворения.

Когезионную прочность покрытий определяли по показателю прочности на осевое растяжение на образцах размером 10x10x50 мм и вычисляли по формуле

$$R_p = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P – разрушающая сила, Н; F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м^2.

Реологические свойства оценивали по показателю пластической прочности, которую определяли с помощью конического пластометра КП-3. Исследования минералогического состава проводили на порошковом дифрактометре D8Advans (Германия) (излучение CuKα, вращение образца, непрерывный (1 град/мин), пошаговый (шаг 0.02°, экспозиция 10 с) режимы в интервале углов 2Θ = 5°–100°) [17]. При идентификации фаз использовали картотеку ICDD PDF2 и Crystallography Open Database1

РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что введение добавки полисахаридов Atren Cem LV и Atren Cem HV способствует резкому повышению пластической прочности по сравнению с контрольным составом в 1,5 раза в момент затворения. Введение пластификатора Sunbo PC 1021 в известковую смесь способствует снижению пластической прочности. В момент затворения пластическая прочность контрольного состава составляла 105 кПа, а с добавкой Atren Cem LV и пластификатором Sunbo PC 1021 – 58кПа. Пластифицирующий эффект добавки Sika ViscoCrete-226 P в начальный момент твердения одинаков с эффектом добавки Sunbo PC 1021, однако спустя 8 часов твердения пластифицирующий эффект добавки Sunbo PC 1021 снижается, пластическая прочность состава становится равной составу с добавкой MasterClenium 115, в то время как составы с добавкой Sika ViscoCrete-226 P сохраняют низкую пластическую прочность, равную 85 кПа (табл.1).

На рис. 1–3 представлены дифрактограммы образцов – контрольного и с добавкой. Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что качественный минералогический состав одинаковый. Однако анализ дифрактограмм свидетельствует об увеличении интенсивности отражений $CaCO_3$, что свидетельствует об увеличении фронта карбонизации. В контрольных образцах содержится большее количество портландита, составляющее 3,1247%. В образцах, приготовленных на извести, гашенной в присутствии добавки, содержание портландита составляет всего 2,155% и в образцах, приготовленных с добавкой, – 2,9404%. Очевидно, вследствие водоудерживающего действия добавки создаются более

Таблица 1
Пластическая прочность известкового состава с добавкой полисахаридов Atren Cem LV

Состав	Значение пластической прочности, кПа
Известь+вода, В/И = 1,0	105
состав с добавкой Atren Cem LV 1% от массы извести, В/И = 1,0	149
состав с добавкой Atren Cem LV и пластификатором Sunbo PC 1021, В/И = 1,0	58
состав с добавкой Atren Cem LV и пластификатором MasterClenium 115, В/И = 1,0	76
состав с добавкой Atren Cem LV и пластификатором Sika ViscoCrete-226 P, В/И = 1,0	56

благоприятные условия для карбонизации извести. Количество кальцита в контрольных образцах составляет 87,4%, в образцах, приготовленных на извести, гашенной в присутствии добавки, – 92,266%, и в образцах, приготовленных с добавкой, – 88,87%.

Органические вещества вследствие аморфной структуры не идентифицируются на рентгенограмме.

Наблюдается некоторое увеличение ширины пиков $CaCO_3$, что свидетельствует о возможном внедрении органических молекул в состав кальцита. Установлено изменение параметров кристаллической решетки в образцах, особенно приготовленных на извести, гашенной в присутствии полисахаридов. Образцы известкового камня на основе извести, гашенной в присутствии полисахаридов, демонстрируют более высокие параметры кристаллической решетки по сравнению с кальцитом контрольного состава (рис. 1–3 и табл. 2). Это свидетельствует о наличии органики в виде внутрикристаллических окклюзий в образце.

Дополнительно были получены ИК-спектры пропускания исследуемых образцов (рис. 4) на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (ООО «Инфраспек», Россия). Образцы готовили в виде прессованных с бромидом калия таблеток при массовом соотношении x:10x, где x – масса исходной навески, 10x – масса KBr. Дегазация образцов в процессе прессования не осуществлялась. Измерения проводили в спектральном диапазоне 450–4050 см$^{-1}$ со спектральным разрешением 4 см$^{-1}$. Для удобства восприятия ИК-спектры нормировались и аддитивно смещались относительно нулевой точки по оси ординат.

Анализ ИК-спектров, представленных на рис. 4, показывает, что для исследуемых образцов 2 и 3 характерно наличие существенного числа мод поглощения, отвечающих их ожидаемому химическому составу – $Ca(OH)_2$+$CaCO_3$. Спектры инфракрасного поглощения с максимумами при 1424 см$^{-1}$ обусловлены CO_3 – группой в кристаллах кальцита. Также имеется интенсивная узкая полоса поглощения в об-

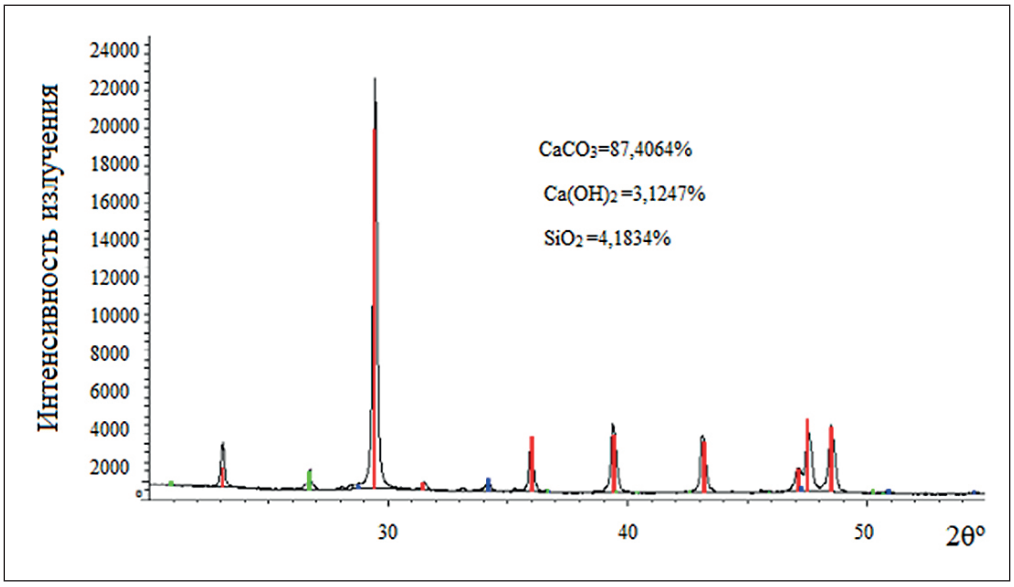

Рис. 1. **Дифрактограмма известкового композита (контрольный состав)**

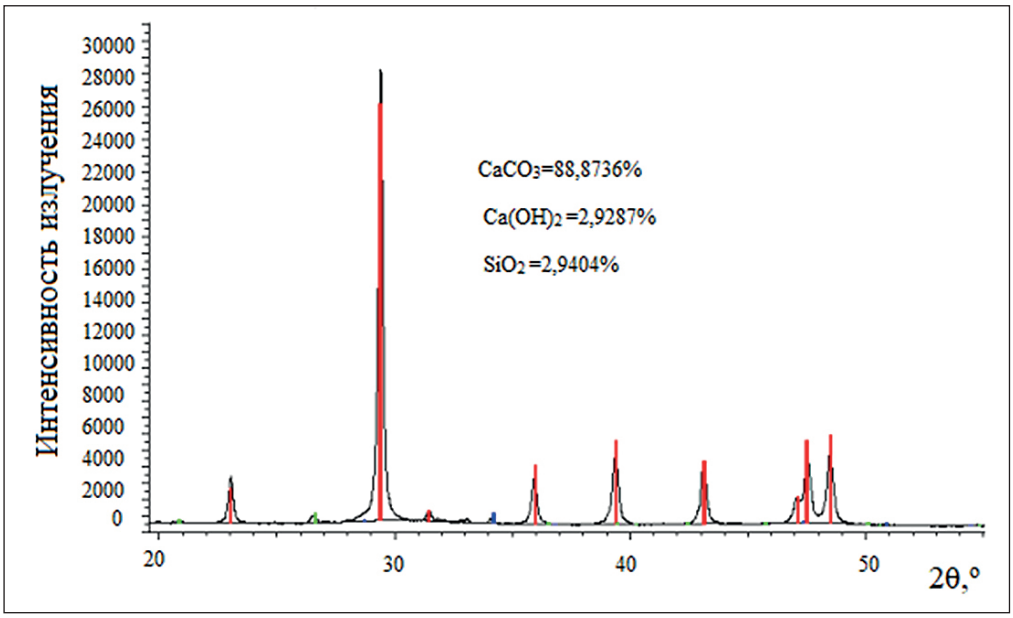

Рис. 2. **Дифрактограмма известкового композита (с добавкой полисахарида Atren Cem HV)**

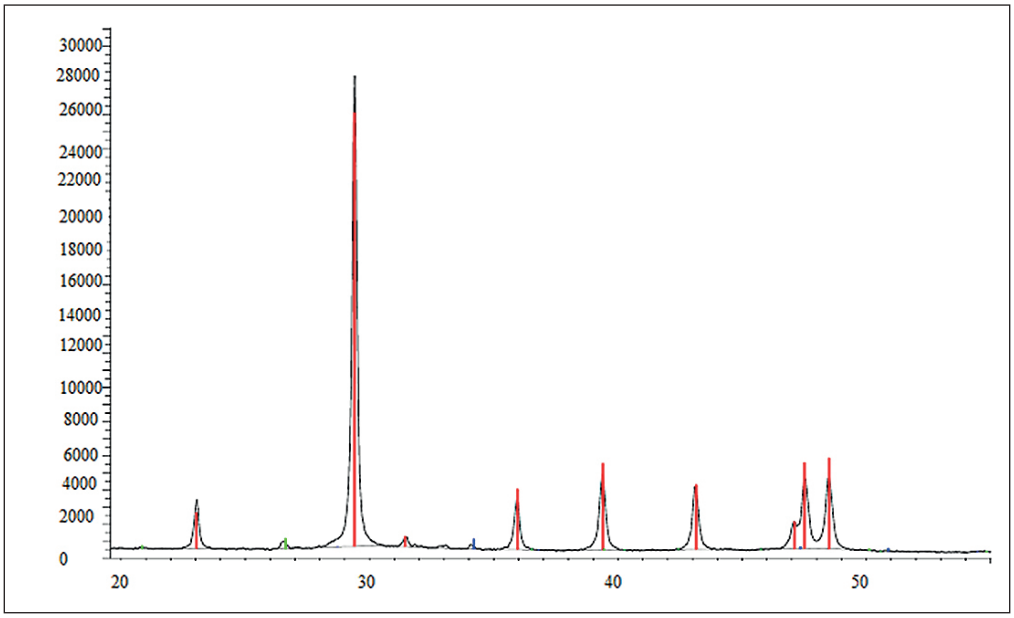

Рис. 3. **Дифрактограмма известкового композита (известь, гашенная в присутствии** добавки полисахарида **Atren Cem HV)**

ласти 876 см$^{-1}$, характерная для кальцита. Большая интенсивность пика в области 876 см$^{-1}$ свидетельствует о большем содержании кальцита в образце с добавкой Atren Cem HV. Очевидно, вследствие водоудерживающей способности полисахаридов создаются более благоприятные условия для карбонизации извести.

Анализ ИК-спектров показывает, что для образца 3 характерно наличие числа мод поглощения, отвечающих органическим компонентам, о чем свидетельствуют полосы валентных колебаний C–H при 2970 и 2870 см$^{-1}$.

Выраженная интенсивность полосы поглощения с максимумом 1650 см$^{-1}$, отвечающая деформационным колебаниям H–O–H, указывает на присутствие в водорастворимом модифицированном полисахариде Atren Cem HV (образец № 1) и в контрольном образце (без добавки) (образец № 2) воды в несвязанном виде. Введение добавки Atren Cem HV (образец № 3) не приводит к возникновению новых колебательных

Таблица 2
Содержание минералов в известковых композитах

Состав	Содержание минералов (отношение интенсивности пиков)		
	$CaCO_3$(I/Ic)	$Ca(OH)_2$(I/Ic)	SiO_2(I/Ic)
контрольный	87,4064% (3,74)	3,1247% (3,530)	4,1834% (4,810)
Гашенная в присутствии добавки	92,2662% (3,490)	2,1550% (3,840)	2,1778% (4,520)
С добавкой	88,8736% (3,74)	2,9287% (3,840)	2,9404%(4,810)
Параметры кристаллической решетки			
	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	SiO_2
контрольный			
a	4,98700	3,58440	4,90000
c	17,05800	4,89620	5,40000
Гашенная в присутствии добавки			
a	4,99100	3,58620	4,91580
c	17,06200	4,88010	5,40910
С добавкой			
a	4,98700	3,58620	4,91000
c	17,05800	4,88010	5,40000

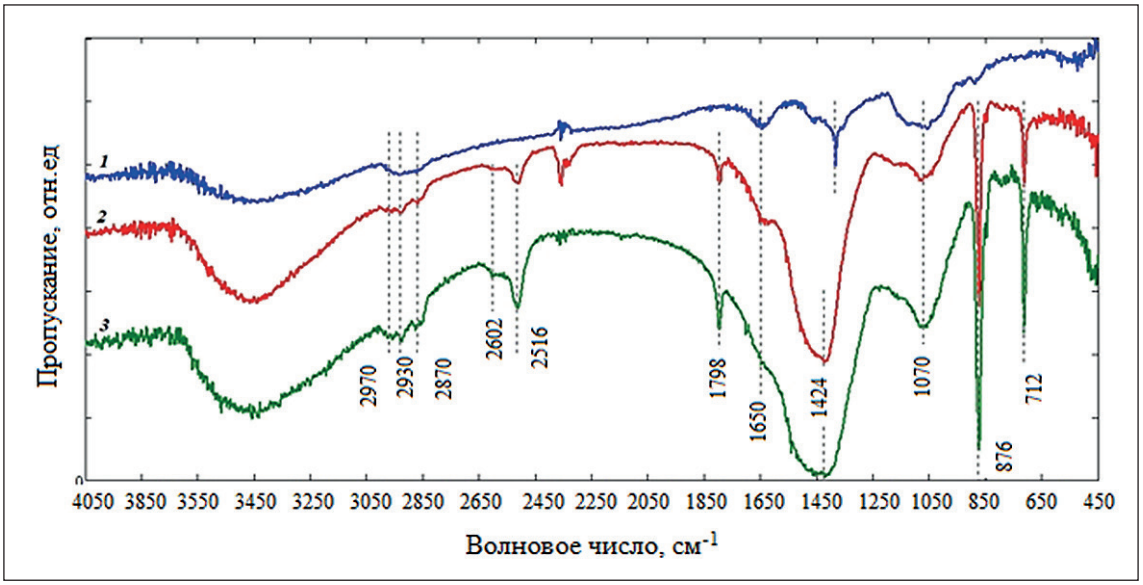

Рис. 4. **ИК-спектры пропускания исследуемых образцов:** 1 – водорастворимый модифицированный полисахарид Atren Cem HV; 2 – контрольный состав; 3 – состав с добавкой полисахарида Atren Cem HV

мод или заметному смещению максимума поглощения уже присутствующих, что позволяет говорить об отсутствии их химического взаимодействия. Интересной особенностью образца № 3 является практически полное исчезновение пика поглощения 1650 см$^{-1}$ и заметное увеличение интенсивности полосы поглощения 3100–3650 см$^{-1}$, отвечающей валентным симметричным колебаниям OH-групп и Ca–OH. Данная особенность, по всей видимости, может указывать, что введение добавки полисахарида в гашеную известь способствует уменьшению концентрации воды в свободном виде в материале.

Результаты оценки когезионной прочности покрытий приведены в табл. 3.

Таблица 3
Прочность при растяжении известковых образцов

Состав	Прочность при растяжении, МПа
Возраст твердения 28 суток	
Контрольный (известь+вода)	0,22
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 1% от массы извести	0,24
Возраст твердения 3 месяца	
Контрольный (известь+вода)	0,264
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 1% от массы извести	0,47
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5% от массы извести	0,379

Полученные результаты свидетельствуют, что известковые составы с добавкой полисахаридов Atren Cem LV характеризуются более высокой когезионной прочностью. По мере увеличения возраста твердения рост когезионной прочности образцов с добавкой синтетического полисахарида Atren Cem LV проявляется в большей степени. Так, в возрасте 28 суток твердения когезионная прочность образцов на основе контрольного состава составляет R 0,22 МПа, а с добавкой полисахарида – 0,24 МПа. В возрасте 3 месяцев твердения различия в значениях когезионной прочности проявляются в большей степени. Когезионная прочность контрольных образцов составляет 0,264 МПа, а образцов с добавкой Atren Cem LV в количестве 1% от массы извести – 0,47 МПа, с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5% от массы извести – 0,379 МПа.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об отсутствии химического взаимодействия между известью и полисахаридами. Показано, что известковые составы с добавкой полисахаридов характеризуются более высокой когезионной прочностью, обусловленной большим содержанием кальцита. Установлено изменение параметров кристаллической решетки в образцах, приготовленных на извести, гашенной в присутствии полисахаридов. Образцы известкового камня на основе извести, гашенной в присутствии полисахаридов, демонстрируют более высокие параметры кристаллической решетки по сравнению с кальцитом контрольного состава, что свидетельствует о наличии органики в виде внутрикристаллических окклюзий в образце.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Запевалова М.В. Обзор рынка сухих строительных смесей // Строительные материалы и услуги. 2022. № 6. Режим доступа: http://www.vashdom.ru/articles/strm5.htm. (дата обращения 2022.06)

2. Bokan Bosiljkov, V. *The use of industrial and traditional limes for lime mortars*. In: Lourenco, P.B., Roca, P. (Eds.), Historical Constructions. University of Minho, Guimaraes: 2001; 343–352.

3. Логанина В.И., Фролов М.В Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей // Вестник гражданских инженеров. 2015. 5 (52). С. 144–147.

4. Loganina V., Davydova O., Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A., Sabitov L., Nabiullina K. Improving the durability of lime finishing mortars by modifying them with silicic acid sol. *Materials*. 2022; 15: 2360. https://doi.org/10.3390/ma15072360

5. Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита // Строительные материалы. 2011. 12. С. 62–65.

6. Комохов П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита // Строительные материалы. 2006. 9. С. 14–15.

7. Комохов П.Г. Нанотехнология радиационностойкого бетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2006. 5. С. 22–23.

8. Логанина В.И., Кислицына С.Н., Макарова Л.В., Садовникова М.А. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. 4 (652). С. 37–42.

9. Логанина В.И., Петухова Н.А., Горбунов В.Н., Дмитриева Т.Н. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. 9 (609). С. 36–39.

10. Логанина В.И., Петухова Н.А., Акжигитова Э.Р. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. 3.С. 8–12.

11. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2006; 84 (1): 157–163.

12. Bakolas A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, A.Moropoulou. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2008; 92 (1): 34–351.

13. Cabrera J. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system / J.Cabrera, M.Frias. *Cement and Concrete Research*. 2001; 31 (2): 177–182.

14. Cachim P. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions / P. Cachim, A. Velosa, F. Rocha. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 71–78.

15. Красиникова Н.М. Влияние полисиликата на структурообразование цементного камня / Н.М. Красиникова, З.Ф. Иксанова // Известия КГАСУ. 2019. 4. С. 347–352.

16. Loganina V.I. Compositions for Limestone Restoration / V.I. Loganina, M.V. Zaytseva. *Key Engineering Materials*. 2022; 909: 177–183.

17. Degryse P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(1457): 63.

18. Genestar C. Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization / C. Genestar, C. Pons. *Journal of Cultural Heritage*. 2002; 4: 291–298.

19. Littmann E.R. Ancient Mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: The use of bark extracts in lime plasters. *Am. Antiquity*.1960; 25:593–597.

20. Magaloni D., Pancella R., Fruh Y., Cañetas J., Castaño V. Studies on the Mayan mortars technique. *MRS Online Proc. Lib*. 1995; 352: 483.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логанина Валентина Ивановна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, loganin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7532-0074

Гарькина Ирина Александровна – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, i.a.naum@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3371-3579

Ткач Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, ev_tkach@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2132-4971

Степина Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, sudeykina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5358-2935

ВКЛАД АВТОРОВ

Логанина В.И. – научное руководство, подготовка образцов, определение удельной поверхности, сбор, анализ и обработка результатов, расшифровка рентгенограмм, написание статьи.

Гарькина Ирина Александровна – изготовление образцов, определение пластической прочности.

Ткач Евгения Владимировна – проведение и расшифровка ИК-спектроскопии.

Степина Ирина Васильевна – обзор литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 26.04.2024; одобрена после рецензирования 25.05.2024; принята к публикации 03.06.2024.

Review article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226

CC BY 4.0

Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part III[1)]

Irina N. Vikhareva*, Vyacheslav E. Antipin
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
* Corresponding author: e-mail: vikharevain@susu.ru

ABSTRACT

Introduction. Coatings on hard materials are widely used in many industries. Coating technologies help prevent or reduce corrosion, contamination and biofouling, chemical and structural degradation, and wear and tear of external surfaces due to exposure to the elements and natural environments. The range of materials used for functional coatings is quite wide: from organic polymers to hybrid composites and inorganic nanoparticles, depending on the desired properties and functionality of the final product. Despite the excellent anti-corrosion characteristics of non-polymer coatings, their usage causes environmental damage. Organic coatings are among the most widely used. Such compositions are applied in liquid form; organic solvents are one of the main components. Environmental concerns have encouraged the development of alternative technologies. The main areas for development are availability of raw materials and the cost of environmentally friendly coatings. **Results and discussion.** The review substantiates the relevance of research on the development of multifunctional polymer-based coatings. The market for polymer coatings is presented. Methods of surface protection, types of coatings formed, their main components, features of the formation of coatings, the influence of various factors on the formation of polymer coatings, including methods of preparation and pre-treatment of the protected surface are presented. Methods for preventing corrosion are discussed in detail, as well as the main directions in the development of anti-corrosion coatings based on various protective mechanisms. The characteristics of the main components of protective coatings are given. The issue of destruction of polymer coatings depending on the operating environment is considered in detail. The types of media, their influence and mechanisms of action on protected objects are considered. Factors and mechanisms of destruction of polymer coatings, methods for preventing degradation of coatings are listed. The latest technologies for the formation of protective polymer coatings are highlighted. **Conclusion.** Currently, coatings provide a wide range of quality indicators. An important characteristic of modern coatings is minimal negative impact on the environment, which requires an integrated approach to the design and production of coatings.

KEY WORDS: adhesion, protection, corrosion, coating, polymer, solvent, thermosetting resin.

FOR CITATION:
Vikhareva I.N., Antipin V.E. Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part III. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(3): 218–226. https:.doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226. – EDN: CYSLIB.

3. DESTRUCTION OF POLYMER COATINGS

Deterioration of organic coatings can be superficial in the form of cosmetic defects and defects leading to corrosion. An important aspect of the development of highly effective anti-corrosion coating systems is the study of the interaction between coating components and the study of the fundamental physical and chemical mechanisms of coating degradation during operation [225].

Anti-corrosion coatings are exposed to various environments and factors: water, soil, atmosphere and ultraviolet radiation. The specific requirements for coating systems are determined mainly by environmental factors and elements interacting with the coating during operation, as well as the time of their exposure. For example, coatings in the industrial sector are exposed to chemicals and rain, while coatings buried in soil interact with bacteria and moisture.

[1)] The end. Parts I, II have been published in the journal "Nanotechnologies in construction". 2024. V. 16. № 1, № 2.

© Vikhareva I.N., Antipin V.E., 2024

3.1. Classification of media

During operation, anti-corrosion coatings are exposed to environments with varying aggressiveness. The classification of environmental conditions by type of exposure is given in state standard 34667.5-2021 (ISO 12944-5:2019) "Paint and varnish materials. Protection of steel structures from corrosion using paint and varnish systems" [226]. The standard describes the environmental effects on steel structures that are exposed to the atmosphere, submerged in water or buried in the ground. The standard provides a classification system based on corrosivity categories for different environmental conditions. Classification of environmental conditions is necessary for the selection of protective systems.

Atmospheric corrosion is a process that occurs on a metal surface under the influence of air moisture. The corrosion rate increases under the influence of the following factors:

- with increasing air humidity;
- when condensation forms;
- with an increase in the amount of pollution in the atmosphere, aggressive pollutants react with the substrate and form deposits on the surface.

Corrosion develops intensively at relative air humidity above 80% and temperatures above 0 °C. If air pollution is high or hygroscopic salts are present, corrosion also occurs at lower humidity.

Climate determines air humidity and temperature. In cold or dry climates, corrosion processes are slowed down. The highest corrosion activity is observed in hot, humid and maritime climates. The determining factor is the humidity period – the time the structure is exposed to high humidity.

Corrosion processes are affected by the placement of structural elements. Outdoor structures experience different climatic conditions and cycles: rain, sun, pollutants in the form of gases, aerosols, etc. The presence of shelter smoothes out the impact of climatic factors. Indoors there is virtually no atmospheric pollution, but the rate of corrosion can increase due to insufficient ventilation, high air humidity and condensation.

In environmental conditions, the corrosiveness is quite low compared to the industrial atmosphere and marine climate. Industrial environments are characterized by high concentrations of atmospheric particulates, soot, sand and sulphate salts. Rain with high levels of sulfur dioxide in the atmosphere forms acid rain and the coating becomes acidic. The marine atmosphere is characterized by a very high content of aggressive Cl-ions, which cause pitting corrosion.

The rate of corrosion processes in water is affected by:

- type of water – fresh, brackish or salty;
- oxygen concentration in water;
- type and concentration of substances dissolved in water;
- water temperature.

Underwater flora and fauna accelerate corrosion.

There are three different zones for immersion of structures in water:

- underwater zone;
- intermediate (or level-fluctuating) zone, the water level on the structure changes due to natural or artificial factors that increase corrosion due to the combined effects of water and the atmosphere;
- zone of splashes and variable wetting, the structure wetted by waves and splashes experiences high corrosion stress, especially when exposed to sea water.

The splash zone is an extremely hostile environment, combining an oxygen-rich atmosphere with a continuous spray of electrolytes from the sea. The degradation of coatings in the splash zone is accelerated by ultraviolet radiation and mechanical stress caused by constant alternation of periods of wet and dry conditions.

Corrosion in the soil depends on the type of soil and is determined by the content of minerals, their types, the presence of organic substances in the soil, the content of water and oxygen, the degree of aeration, and the presence of bacteria.

Structures submerged in water or buried in soil may be damaged by sand, gravel or rocks, biofouling.

3.2. Mechanisms of destruction

Corrosion is a process that occurs during the physical and chemical interaction of a metal with the environment. For corrosion processes to occur, an electrolyte solution and a metal conductor are required between two separate areas with different potentials, that is, the anode and the cathode. Besides iron and steel, other examples of corrosion products are green patina on copper and white rust on zinc.

As a result of corrosion processes, anodic and cathodic regions are formed on the steel substrate. At the cathode, oxygen is reduced on the catalytically active surface of the oxidized metal predominantly to hydroxo ions (reaction 3), but other reaction products such as peroxides, superoxides and radicals can also be formed. Several corrosion reactions occur at the anode, resulting in the formation of Fe^{2+} ions and electrons (reaction 4).

$$2H_2O\ (1) + O_2\ (aq) + 4e^- \rightarrow 4OH^-\ (aq), \quad (3)$$

$$Fe\ (s) \rightarrow Fe^{2+}\ (aq) + 2e^-. \quad (4)$$

Iron (II) hydroxide then oxidizes into iron oxides to form green hydrated magnetite: $FeO \bullet Fe_2O_3 \bullet H_2O$:

$$6Fe(OH)_2\ (aq) + O_2\ (aq) \rightarrow 4H_2O(1) + 2FeO \bullet Fe_2O_3 \bullet H_2O. \quad (5)$$

Hydrated magnetite is unstable and decomposes into black magnetite:

$$FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s) \rightarrow FeO \cdot Fe_2O_3\ (s) + H_2O. \quad (6)$$

In the presence of oxygen, black magnetite oxidizes into a stable red-brown hydrated hematite ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) called rust:

$$4FeO \cdot Fe_2O_3\ (s) + 6O_2\ (aq) + 3H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow 6Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s). \quad (7)$$

General reaction

$$4Fe\ (s) + 3O_2\ (aq) + 3H_2O\ (1) \rightarrow$$
$$\rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s). \quad (8)$$

The driving force for corrosion (Figure 14) for steel is the potential difference between the anodic and cathodic sites. The overall electrical equilibrium potential of a galvanic cell is determined by the difference in standard potentials between the anodic and cathodic reactions of the half-cell: E^0_{Ox} and E^0_{Red}, respectively.

3.3. Factors of destruction

Under atmospheric conditions, the coating is exposed to various factors, which leads to the formation of cosmetic defects: loss of gloss, color change and chalking. Most cosmetic defects are caused by degradation of the binder under the influence of UV radiation [227–228]. More serious problems are cracks in the coating and loss of adhesion.

Since adhesion reduction occurs before corrosion occurs, it is important to know the mechanisms responsible for the reduction of adhesion between an organic coating and a metal substrate [229]. For example, in atmospheric conditions, zinc coatings can peel off due to poor curing conditions, which subsequently leads to compromised corrosion protection. The mechanism responsible for the decrease in adhesion is “wet adhesion”, i.e. adhesion of a coating to a metal substrate in the presence of water [229]. Water vapor always eventually penetrates the coating. Water molecules at the interface between the coating and the substrate bind hydrogen ions and neutralize the adhesion forces between the coating and metal oxides [230]. A small number of polymer-metal bonds are suitable to withstand hydrolysis over a long period of time. Thus, in a humid environment, adhesion weakens, an electrolyte solution is formed at the interface, and as a result, corrosion processes are initiated. Using FTIR-MIR methods, the thickness of the safe water layer was determined, and it was also discovered that this layer accumulates with increasing potential. Several layers of coating are required to inhibit water accumulation [231–233]. The process of

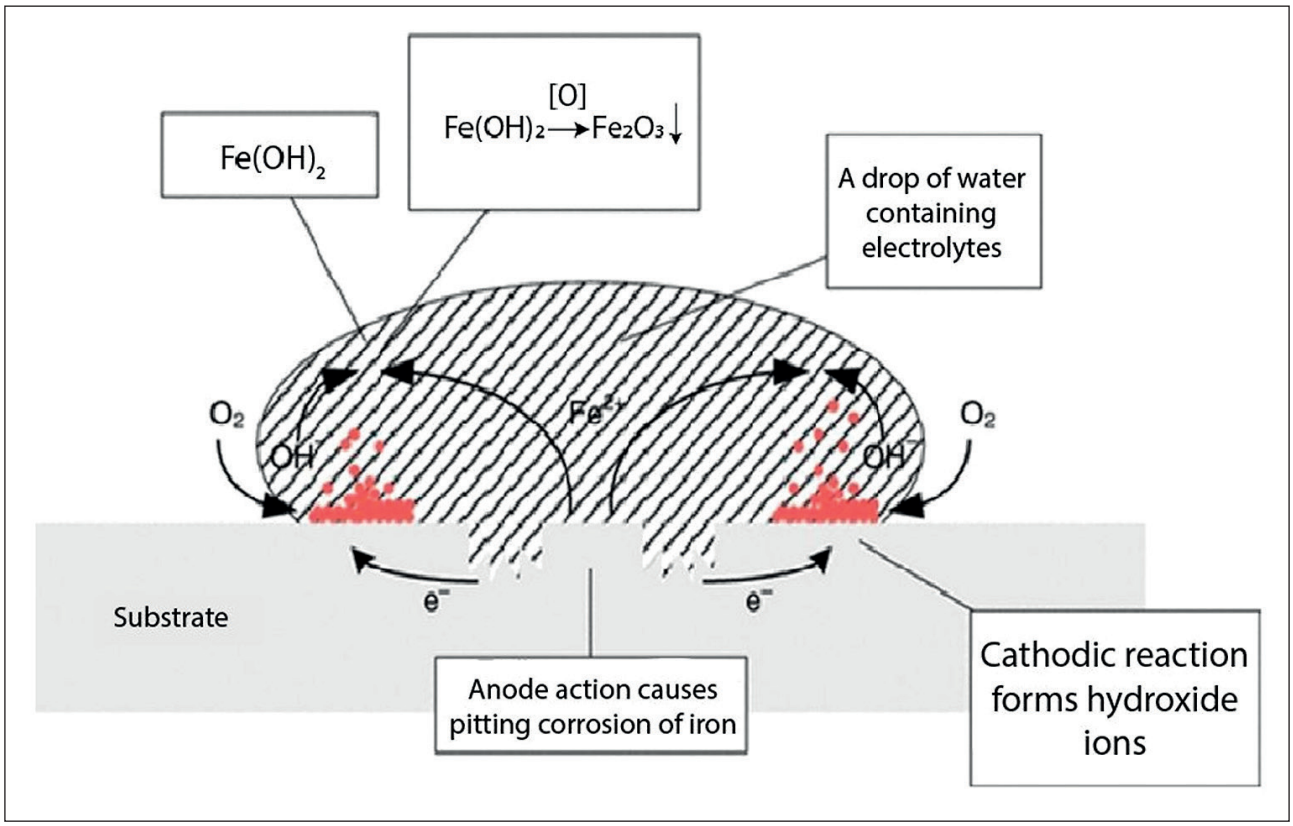

Fig. 14. **Scheme of corrosion processes on steel**

water accumulation at the coating-substrate interface is confirmed by studies of water absorption in adjacent and free films. Water absorption in adjacent areas of coatings is higher than in the corresponding free films [234]. Based on the magnitudes of metal-adhesion interaction energies (in the range of about 25 kJ/mol or lower) and metal-water interactions (binding energies in the range of 40–65 kJ/mol), water displacement of the coating is likely [235].

3.4. Types of destruction

Filiform corrosion

In humid atmosphere conditions, filamentous corrosion is a relevant mechanism for the degradation of organically coated metals. Although filamentary corrosion is often observed on organically coated aluminum parts, magnesium and cold-rolled steel are no exception. Filiform corrosion usually occurs on microscopic scratches or coating defects. Filiform corrosion is usually superficial and consists of thin filamentous deposits, especially progressing under the coating along the surface. Corrosion threads can be thought of as a corrosion head followed by a tail, which are porous corrosion products. Oxygen acts exclusively on the active corrosion head [236]. Differential aeration is observed as oxygen and water enter the corrosion head through diffusion through the porous tail [237]. The only effective method of preventing filament corrosion is to dehydrate the filament head by reducing the relative humidity to approximately 60%. Multiple layers of coating, low water vapor transmission and inhibitors slow but do not prevent filamentous corrosion in environments where humidity cannot be controlled.

Degradation of submerged coatings

In systems with embedded organic coatings, the most important and common forms of visible failure are blistering and delamination (Figure 15). The differential interaction of hydroxyl ions with the metal substrate leads to either cathodic swelling or cathodic delamination. The formation of bubbles is the result of osmotic pressure due to the high solubility of the cathodic reaction products in water. As a result of the resulting alkaline environment, due to the presence of cathode reaction products, bonds are broken at the coating-metal interface, which leads to delamination.

The alkaline environment under the peeling coating and in the cathode areas is associated with the main corrosion processes of steel in seawater. The presence of defects in the protective coating contributes to a more active impact of the environment on the steel. This is how a galvanic cell with anode and cathode regions is formed. The steel dissolves in the anodic region. The oxidized metals then catalyze cathodic reactions, the anodic reaction being balanced by the cathodic reaction. Under natural conditions, the cathodic reaction will involve the reduction of oxygen [238].

Cathode stratification

In the case of an anti-corrosion coating with defects, in practice, corrosion begins much faster than for a coating without defects. The basic principles of cathode dissection are generally described [239]. It is believed that the cause of delamination is the so-called cathodic polarization caused by the action of hydroxyl ions or chemical reactions. Oxygen and water necessary for depolarization of the cathode region penetrate through the coating or along the coating-substrate interface. Then oxygen diffusing to the damaged areas enters into the oxidation reaction $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$.

Researchers have paid much attention to studying the transport of water, oxygen and cations through organic coatings onto a metal substrate. It has been shown that typical organic coatings are sufficiently permeable to water and oxygen, and therefore are not able to inhibit delami-

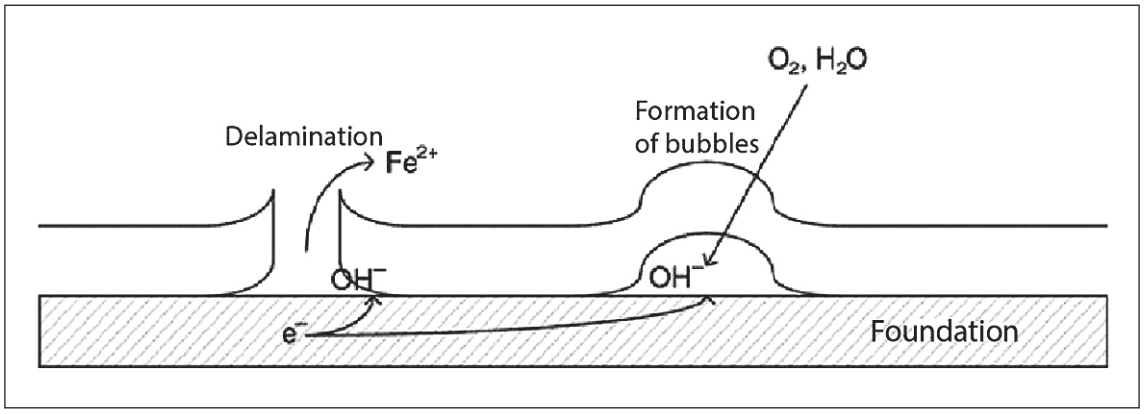

Fig. 15. **Sketch of delamination and swelling of the coating**

nation [240–241]. The transfer of ions from the environment to the metal surface is carried out through discrete channels with low resistance in the coating. The presence of alkali metal ions and OH ions leads to the formation of an alkaline environment under the coating and in the cathode region the pH can reach 12–14 [242–243]. Diffusion of cations to neutralize the charge of hydroxyl ions is usually the rate-limiting step. It has been proven that the transport of cations along the coating-steel interface occurs much faster than through the coating. The delamination of the coating is controlled by the diffusion of cations [244–245]. This hypothesis is confirmed by the dependence of the separation rate on the hydrated size of the cations. However, a slight change in the rate of delamination in a more stable silane-modified epoxy coating showed that interfacial transport itself does not determine the rate of cathodic segregation.

In cathode blisters under the coating, high alkalinity causes degradation of the coating. However, the exact mechanism has not yet been described. According to [246], the mechanisms of loss of adhesion between the substrate and the coating in an alkaline environment can be divided into three groups: "reduction of the oxide layer, chemical degradation of the polymer, interfacial fracture." The first way of forming areas of delamination is preferable [246]. Based on this mechanism, the degradation of epoxy and thermosetting acrylic and polybutadiene coatings on cathode-protected steel is described. According to the diagram, such processes are quite predictable for iron at pH = 14 and at cathode potentials less than 960 mV SHE. In situ X-ray photoelectron spectroscopy measurements confirmed that, in an alkaline environment, significant reduction of iron oxide is only possible at cathode potentials less than 800 mV SHE [247–248].

During operation, the polymer matrix of the coating undergoes chemical decomposition; at elevated pH, saponification occurs. Similar cases have been described with coatings based on polyethylene, polybutadiene and epoxy resins on cathode-protected steel [249]. For example, degradation by saponification in the case of polybutadiene coatings is accelerated at pH > 11.8. Studies have shown that the area of initial destruction of the polymer coating is located near the metal surface [250]. The radicals HO^{2-}, OH and O^{2-} formed during the reduction of oxygen are the main factor in the degradation processes of the organic layer [251].

Schemes of cathode stratification mechanisms based on literature data are shown in the Figure 16.

In the area of the defect, due to the presence of water, oxygen, and electrolyte ions, a galvanic cell is installed. The resulting hydroxyl ions lead to high alkalinity in the area and reduced adhesion between the substrate and coating. Internal stresses in coatings, temperature and humidity changes that arise during the curing of the resin accelerate corrosion processes. The rate of separation in alkaline solutions [252–253] is significantly lower.

Damage and subsequent detachment of the organic coating from the metal surface occurs in various ways: in the form of cathode dissection, in the form of filamentous corrosion, or when these processes occur together.

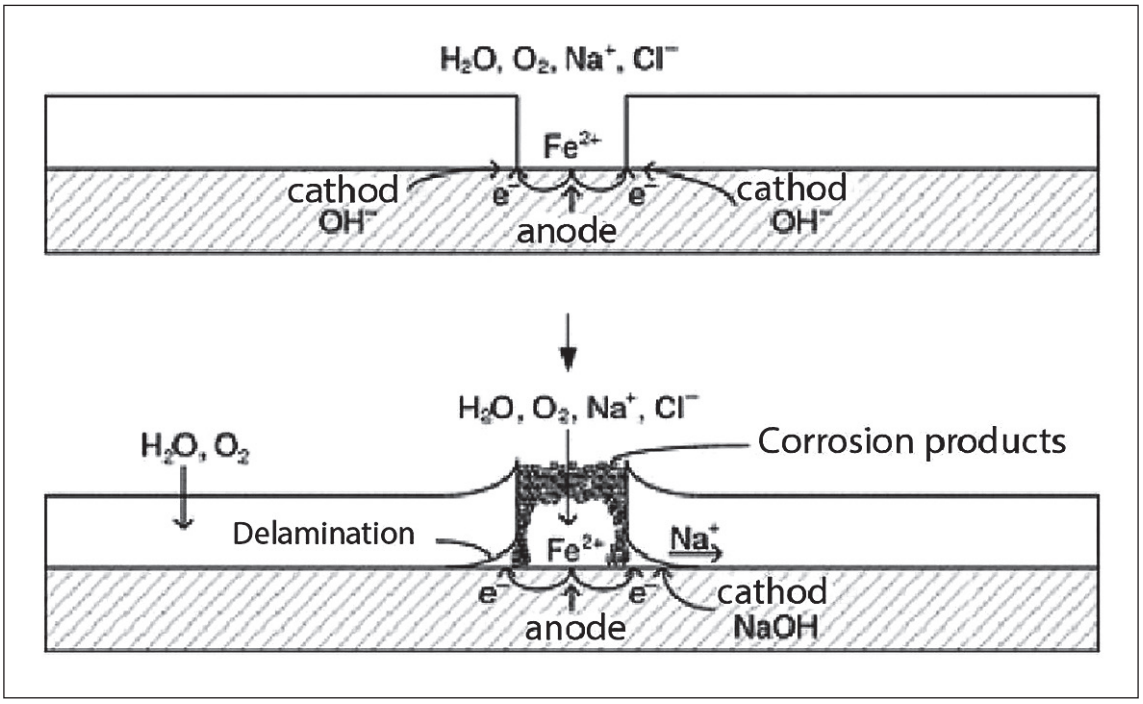

Fig. 16. **Delamination of the coating after damage**

Delamination of organic coatings on surfaces treated with chromate or phosphate is a consequence of dissolution of the conversion layer. It has been proven that delamination of epoxy coatings on chromated steel is caused by deterioration of the conversion coating itself. Cathodic conditions under the epoxy coating reduce $Cr^{6+} \rightarrow Cr^{3+}$. In the case of phosphate conversion coatings, similar processes occur [254]. Experimental data confirm a reduction in coating peeling under cathodic conditions in the presence of phosphate-containing pigments [255]. However, the characteristics of phosphate-pigmented coatings under cathodic conditions ensure that the binder is resistant to alkali displacement at the coating-steel interface. The decrease in the rate of delamination in the presence of phosphate-containing pigments is explained by the deposition of a phosphate layer on the cathode sites and the polarization of the cathode reaction [256]. Among the factors of cathodic stratification of coatings, one can also highlight the degradation of polymers as a result of oxidative processes and interaction with active intermediate products, such as H_2O_2 and HO_2, and OH radicals. It is stated that their action is more destructive to the coating than the resulting alkaline environment.

Cathode bubble formation

The formation of blisters is the first visible sign of inadequate protection of the anti-corrosion organic coating. The formation of bubbles on defect-free coatings is described by the following stages: swelling, expansion due to swelling, gas formation and subsequent osmotic processes [257]. It is water-soluble contaminants on the surface of the substrate that are responsible for the formation of osmotic bubbles. Research has been carried out to determine the maximum permissible concentrations of pollutants; in research studies there are significant discrepancies in the limits of the permissible amount of water-soluble pollutants on the substrate before applying coatings.

The fundamental model for the degradation of defect-free organic coatings on steel in a neutral electrolyte assumes the formation of cathode swelling after the transfer of ions along conductive paths. It is assumed that water-soluble cations diffuse through the coating in low cross-linked or low molecular weight regions. The degradation of a defect-free coating under the action of a neutral electrolyte can be summarized in the following stages (in Figure 17, the number in the circle corresponds to the stage number):

Stage 1 – pathways develop under the influence of water in hydrophilic regions or regions with low cross-linking density;

Stage 2 – electrolyte ions diffuse along conductive paths to the surface of the substrate;

Stage 3 – formation of anodic areas on the surface of the substrate;

Stage 4 – formation of cathode sections on the periphery of the tracks;

Stage 5 – Na^+ ions diffuse to the cathode sites to neutralize the charge along the coating-substrate interface;

Stage 6 – alkalinity of the environment promotes cathode stratification;

Stage 7 – water passes through the coating to the cathode areas due to the hygroscopicity of the material in the cathode areas;

Stage 8 – bubbles enlarge and merge.

However, studies have not established the mechanism and reasons for the formation of cathode bubbles, their relationship with certain areas at the coating-substrate interface, such as interfacial microvoids or defects in the structure of the substrate surface. Cathode bubbles can form near the exposed area and on damaged areas of the coating. The damaged area may be a coating defect (pores and microvoids) or an area with low cross-link density. The liquid in neutral blisters is slightly acidic or neutral, while the liquid in cathode blisters is strongly alkaline.

CONCLUSION

Protective coatings are one of the most effective, cost-effective and simple strategies for preventing damage. In particular, anti-corrosion protection of coatings is based on barrier properties, self-healing, active corrosion inhibition, anodic passivation and cathodic protection. Polymer coatings protect a larger tonnage of metal compared to other anti-corrosion methods. While coatings were originally developed solely to protect metals and alloys from corrosion, there is now a need to develop coatings that provide a wide range of quality properties and minimal negative impact on the environment, which requires an integrated approach to the design and production of coatings. In combination with this, it is necessary to develop modern methods for determining the characteristics of coatings by their morphology, chemical and physical properties and corrosion behavior. In addition, the vast majority of research in coating development has been conducted *ex situ*. In this regard, to fully investigate the properties and mechanisms of coatings, ideally there should be a synergistic use of methods to study the properties and mechanisms of coatings, as well as to obtain a deep mechanistic understanding at different length scales – studying the behavior of the coating *in situ*. Future research should focus on investigating the cause-and-effect relationships between metal surface properties, moisture penetration, and corrosion rates to develop a multiscale, quantitative, and simulation model to evaluate the anticorrosion properties and durability of organic coatings.

Nanotechnology has great potential for creating highly effective anti-corrosion coatings: increasing water adsorption/absorption, thermomechanical proper-

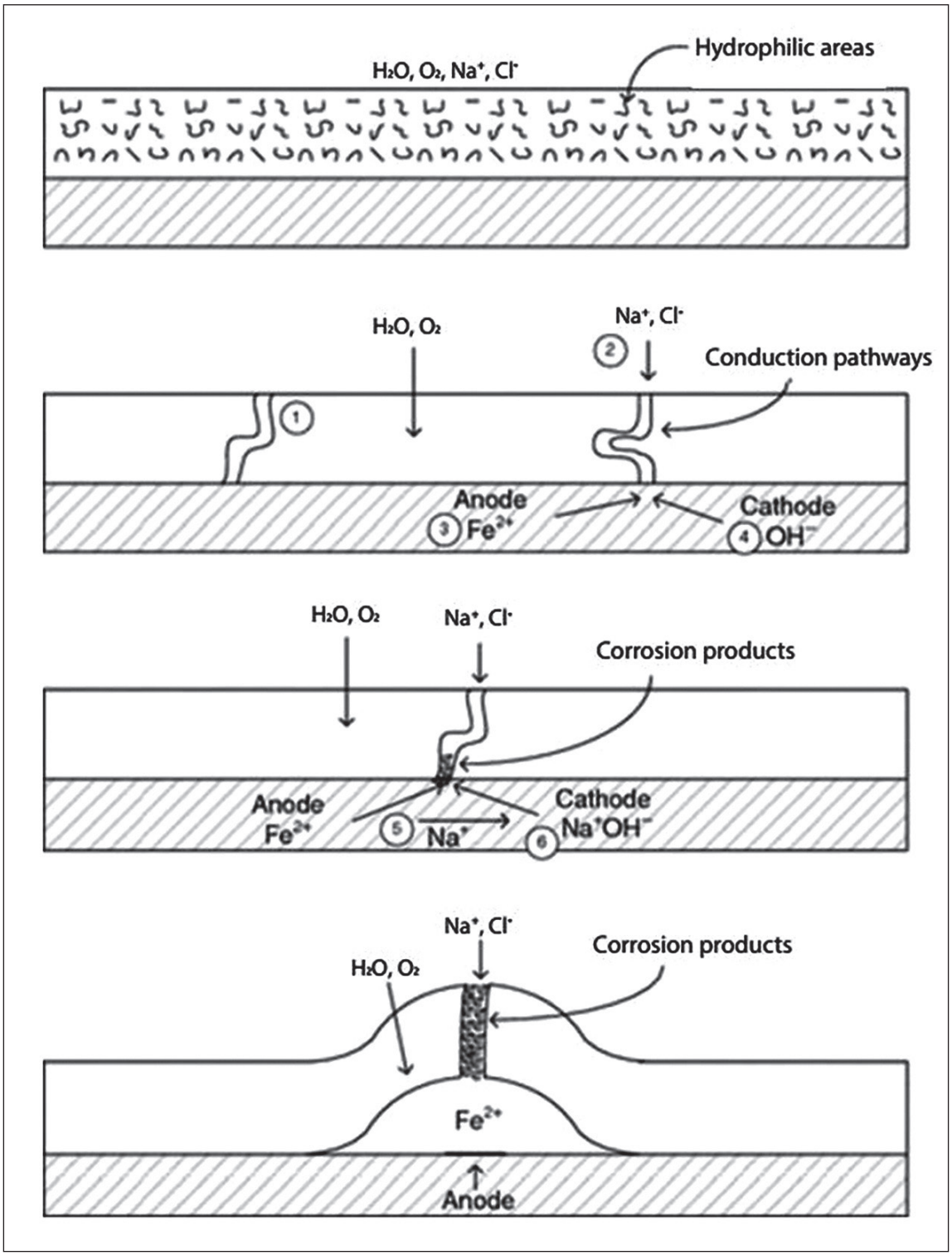

Fig. 17. **Mechanism of destruction of defect-free organic coatings on steel in a neutral electrolyte environment**

ties, adhesion to the substrate, ultraviolet resistance and chemical resistance, wear resistance, electrical conductivity, cross-linking density, uniformity and biocompatibility. The use of nanomaterials in organic coatings significantly improves barrier properties by reducing porosity and increasing the tortuosity path for corrosives. The development of environmentally friendly polymers, nanoparticles and corrosion inhibitors is a promising solution for creating more environmentally friendly nanocomposite organic coatings.

REFERENCES

225. Kalenda P., Kalendova A., Mosner P., Poledno M. Efficiency of Anticorrosive Pigments Based on Modified Phosphate. *Macromol. Symp*. 2002; 187: 397.

226. GOST 34667.5-2021. Paint and varnish materials. Protection of steel structures against corrosion by means of paint and varnish systems.

227. Valet A. Light Stabilizers for Paints. Vincentz Verlag, Hanover. 1997.

228. Funke W. Towards a Unified View of the Mechanisms Resposible for Paint Defects by Metallic Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1985; 24: 343.

229. Ochs H., Vogelsang J., Meyer G. Enhanced Surface Roughness of Organic Coatings due to UV-Degradation: An Unknown Surface of EIS-Artifacts. *Prog. Org. Coat*. 2003; 46: 182.

230. Funke W. Blistering of Paint Films and Filliform Corrosion. *Prog. Org. Coat*. 1981; 9: 29.

231. Nguyen T., Byrd E., Bentz D. Quantifying Water at the Organic Film/Hydroxylated Substrate Interface. *J. Adhes*. 1995; 48: 169.

232. Leidheiser H. Towards a Better Understanding of Corrosion Beneath Organic Coatings. *Corrosion*. 1983; 39: 189.

233. Nguyen T., Byrd E., Bentz D., Lin C. In Situ Measurement of Water at the Organic Coating/Substrate Interface. *Prog. Org. Coat*. 1996; 27: 181.

234. Funke W., Haagen H. Empirical or Scientific Approach to Evaluate the Corrosion Protective Performance of Organic Coatings. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1978; 17: 50.

235. Linossier I., Gaillard M., Romand M. A Spectroscopic Technique for Studies of Water Transport Along the Interface and Hydrolytic Stability of Polymer/Substrate Systems. *J. Adhes*. 1999; 70: 221.

236. Ruggeri R.T., Beck T.R. An Analysis of Mass-Transfer in Filiform Corrosion. *Corrosion*. 1983; 39: 452.

237. Nguyen T., Hubbard T.B., Pommersheim J.M. Unified model for the Degradation of Organic Coatings on Steel in a Neutral Electrolyte. *J. Coat. Technol*. 1996; 68: 45.

238. Deflorian F., Rossi S. The Role of Ions Diffusion in the Cathodic Delamination Rate of Polyester Coated Phosphatized Steel. *J. Adhes. Sci. Technol*. 2003; 17: 291.

239. Dickie R.A. Chemical Studies of the Organic Coating/Steel Interface After Exposure to Aggressive Environments. *ACS Symposium Series*. 1986; 322: 136.

240. Lyon S.B., Philippe L., Tsuousoglou E. Direct Measurements of Ionic Diffusion in Protective Organic Coatings. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2006; 23.

241. Koehler E.L. The Mechanism of Cathodic Disbondment of Protective Organic Coatings – Aqueous Displacement at Elevated pH. *Corrosion*. 1984; 5.

242. Parks J., Leidheiser H. Ionic Migration through Organic Coatings and Its Consequences to Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1986; 25: 1.

243. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 2. *J. Mater. Sci*. 1984; 2259.

244. Leidheiser H., Granata R.D. Ion Transport through Protective Polymeric Coatings Exposed to an Aqeous Phase. *J. Res. Dev*. 1988; 582.

245. Grundmeier G., Stratmann M. Adhesion and De-Adhesion Mechanisms at Polymer/Metal Interfaces: Mechanistic Understanding Based on In-Situ Studies of Buried Interfaces. *Annu. Rev. Mater. Sci*. 2005; 35: 571.

246. Ritter J.J. Ellipsometric Studies on the Cathodic Delamination of Organic Coatings on Steel and Iron. *J. Coat. Technol*. 1982; 54: 51.

247. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 1. *J. Mater. Sci*. 1983; 18: 2987.

248. Murase M., Watts J.F. XPS Study of Coating Delamination from Non-Rinse Chromate Treated Steel. *J. Mater. Sci*. 1998; 8: 1007.

249. Watts J.F. Mechanistic Aspects of the Cathodic Delamination of Organic Coatings. *J. Adhes*. 1989; 73.

250. Hamade R.F., Dillard D.A. Cathodic Weakening of Elastomer-to-Metal Adhesive Bonds: Accelerated Testing and Modeling. *J. Adhes. Sci. Technol*. 2003; 17: 1235.

251. Pommersheim J.M., Nguyen T., Zhang Z., Hubbard J.B. Degradation of Organic Coatings on Steel: Mathematical Models and Predictions. *Prog. Org. Coat*. 1994; 25: 23.

252. Darwin A.B., Scantlebury J.D. The Behaviour of Epoxy Powder Coatings on Mild Steel under Alkali Conditions. *J. Corros. Sci. Eng*. 1999; 2.

253. Smith A.G., Dickie R.A. Adhesion Failure Mechenisms of Primers. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1978; 17: 42.

254. Sommer A.J., Leidheiser H. Effect of Alkali Metal Hydroxides on the Dissolution of Zinc Phosphate Conversion Coating on Steel and Pertinence to Cathodic Delamination. *Corrosion*. 1987; 43: 661.

255. Hernandez M.A., Galliano F., Landolt D. Mechanism of Cathodic Delamination Control of Zinc Aluminum. *Corros. Sci*. 2004; 46: 2281.

256. Furbeth W., Stratmann M. Investigation of the Delamination of Polymer Films from Galvanized Steel with the Scanning Kelvin Probe. *Fresenius J. Anal. Chem*. 1995; 353: 337.

257. de la Fuente D., Bohm M., Houyoux C., Rohwerder M., Morcillo M. The Settling of Critical Levels of Soluble Salts for Painting. *Prog. Org. Coat*. 2007; 58: 23.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina N. Vikhareva – Cand. Sci. (Chem.), Deputy Director of the Research Center "Nanotechnologies", South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, vikharevain@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5681-2767

Vyacheslav E. Antipin – Cand Sci. (Eng.), Deputy Director of the Research Center "Nanotechnologies", South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, antipinve@susu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4337-1760

AUTHORS CONTRIBUTION

Irina N. Vikhareva – research concept; development of methodology; writing the preliminary text.

Vyacheslav E. Antipin – conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 06.02.2024.

Обзорная статья
УДК 547.057
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226

CC BY 4.0

Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть III[1)]

Ирина Николаевна Вихарева*, **Вячеслав Евгеньевич Антипин**
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: vikharevain@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Покрытия на твердых материалах широко используются во многих отраслях промышленности. Технологии нанесения покрытий способствуют предотвращению или уменьшению коррозии, загрязнения и биообрастания, химической и структурной деградации, износа внешних поверхностей из-за воздействия элементов и природных условий. Спектр используемых материалов для функциональных покрытий достаточно широкий: от органических полимеров до гибридных композитов и неорганических наночастиц в зависимости от желаемых свойств и функциональности конечного продукта. Несмотря на отличные антикоррозионные характеристики неполимерных покрытий, их использование наносит экологический ущерб. Наиболее широкое применение получили органические покрытия. Такие составы наносят в жидкой форме, органические растворители в них являются одним из основных компонентов. Экологические требования способствовали разработке альтернативных технологий. Доступность сырья и стоимость экологически чистого покрытия являются основными направлениями разработок. **Основная часть.** В обзоре обоснована актуальность исследований по разработке многофункциональных покрытий на основе полимеров. Представлен рынок полимерных покрытий. Приведены методы защиты поверхности, типы формируемых покрытий, их основные компоненты, особенности формирования покрытий, влияние различных факторов на формирование полимерных покрытий, включая методы подготовки и предварительной обработки защищаемой поверхности. Подробно рассмотрены методы предотвращения коррозии, а также основные направления в разработке антикоррозийных покрытий, основанные на различных защитных механизмах. Приведены характеристики основных компонентов защитных покрытий. Подробно рассмотрен вопрос разрушения полимерных покрытий в зависимости от среды эксплуатации. Рассмотрены типы сред, их влияние и механизмы действия на защищаемые объекты. Перечислены факторы и механизмы разрушения полимерных покрытий, методы предотвращения деградации покрытий. Выделены новейшие технологии формирования защитных полимерных покрытий. **Заключение.** В настоящее время покрытия обеспечивают широкий спектр качественных показателей. Важной характеристикой современных покрытий является минимальное негативное воздействие на окружающую среду, что требует комплексного подхода к проектированию и производству покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адгезия, защита, коррозия, покрытие, полимер, растворитель, термореактивная смола.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Вихарева И.Н., Антипин В.Е. Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 218–226. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226. – EDN: CYSLIB.

3. РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Разрушение органических покрытий может быть поверхностным в виде косметических дефектов и дефектов, приводящих к коррозии. Важным аспектом разработки высокоэффективных антикоррозионных систем покрытий являются исследование взаимодействия между компонентами покрытий и изучение фундаментальных физических и химических механизмов деградации покрытий во время эксплуатации [225].

Антикоррозионные покрытия подвергаются воздействию различных сред и факторов: воды, почвы, атмосферы и ультрафиолетового излучения. Конкретные требования к системам покрытий определяются в основном факторами окружающей среды и элементов, взаимодействующих с покрытием во время эксплуатации, а также временем их воз-

[1)] Окончание. Часть I, II опубликованы в журнале «Нанотехнологии в строительстве». 2024. Т. 16. № 1, № 2.

© Вихарева И.Н., Антипин В.Е., 2024

действия. Например, покрытия в промышленном секторе подвергаются воздействию химикатов и дождя, тогда как покрытия, зарытые в почву, взаимодействуют с бактериями и влагой.

3.1. Классификация сред

В процессе эксплуатации на антикоррозионные покрытия воздействуют среды с различной агрессивностью. Классификация условий окружающей среды по типу воздействия приведена в ГОСТ 34667.5-2021 (ISO 12944-5:2019) «Материалы лакокрасочные. Защита стальных конструкций от коррозии при помощи лакокрасочных систем» [226]. Стандарт описывает воздействие окружающей среды на конструкции из стали, находящиеся в атмосфере, погруженные в воду или заглубленные в грунт. В стандарте представлена система классификации, основанная на категориях коррозионной активности для разных условий окружающей среды. Классификация условий окружающей среды необходима для выбора защитных систем.

Атмосферная коррозия – процесс, происходящий на металлической поверхности при действии влаги воздуха. Скорость коррозии увеличивается под воздействием следующих факторов:

– при увеличении влажности воздуха;
– при образовании конденсата;
– при увеличении количества загрязнений в атмосфере агрессивные загрязняющие вещества вступают в реакцию с подложкой и образовывают отложения на поверхности.

Интенсивно коррозия развивается при относительной влажности воздуха выше 80% и температуре выше 0 °C. При высокой загрязненности воздуха или присутствии гигроскопичных солей коррозия возникает и при более низкой влажности.

Климат определяет влажность и температуру воздуха. В холодном или сухом климате коррозионные процессы замедлены. Наиболее высокая коррозионная активность наблюдается в жарком, влажном и морском климате. Определяющим фактором служит период влажности – время воздействия высокой влажности на конструкцию.

На коррозионные процессы влияет размещение элементов конструкции. Конструкции на открытом воздухе испытывают разные климатические условия и циклы: дождь, солнце, загрязняющие вещества в виде газов, аэрозолей и т.п. Наличие укрытия сглаживает воздействие климатических факторов. В закрытом помещении атмосферное загрязнение практически отсутствует, но скорость коррозии может увеличиваться из-за недостаточной вентиляции, высокой влажности воздуха и образования конденсата.

В условиях окружающей среды коррозионная агрессивность по сравнению с промышленной атмосферой и морским климатом довольно низкая. Промышленные среды характеризуются высокой концентрацией твердых частиц в атмосфере, сажи, песка и сульфатных солей. Дождь с высоким содержанием диоксида серы в атмосфере образует кислотные дожди, и покрытие попадает в кислую среду. Морская атмосфера характеризуется очень высоким содержанием агрессивных ионов Cl^-, вызывающих точечную коррозию.

На скорость коррозионных процессов *в воде* влияют:

– тип воды – пресная, солоноватая или соленая;
– концентрация кислорода в воде;
– тип и концентрация растворенных в воде веществ;
– температура воды.

Ускоряют коррозию подводные флора и фауна.

Выделяют три разные зоны погружения конструкций в воду:

– подводная зона;
– промежуточная (или с колебанием уровня) зона, уровень воды на конструкции меняется из-за естественных или искусственных факторов, увеличивающих коррозию из-за комбинированного воздействия воды и атмосферы;
– зона брызг и переменного смачивания, смачиваемая волнами и брызгами конструкция испытывает высокое коррозионное напряжение, особенно при действии морской воды.

Зона брызг представляет собой чрезвычайно агрессивную среду, поскольку сочетает богатую кислородом атмосферу и непрерывные брызги электролитов из моря. Деградация покрытий в зоне брызг ускоряется под действием ультрафиолетового излучения и механического напряжения, вызванного постоянным чередованием периодов влаги и сухости.

Коррозия в грунте зависит от типа почвы и определяется содержанием минеральных веществ, их видов, наличием в грунте органических веществ, содержанием воды и кислорода, от степени аэрации, наличием бактерий.

Конструкции, погруженные в воду или зарытые в почву, могут пострадать от песка, гравия или камней, биообрастания.

3.2. Механизмы деструкции

Коррозия – процесс, возникающий при физико-химическом взаимодействии металла с окружающей средой. Для протекания коррозионных процессов необходим раствор электролита и металлический проводник между двумя отдельными областями с разными потенциалами, то есть анодом и катодом. Помимо железа и стали, другими примерами про-

дуктов коррозии являются зеленая патина на меди и белая ржавчина на цинке.

В результате коррозионных процессов на стальной подложке образуются анодные и катодные области. На катоде кислород восстанавливается на каталитически активной поверхности окисленного металла преимущественно до гидроксоионов (реакция 3), но могут образовываться и другие продукты реакции, такие как пероксиды, супероксиды и радикалы. На аноде происходит несколько реакций коррозии, результатом которых является образование ионов Fe^{2+} и электронов (реакция 4).

$$2H_2O\ (1) + O_2\ (aq) + 4e^- \rightarrow 4OH^-\ (aq), \quad (3)$$

$$Fe\ (s) \rightarrow Fe^{2+}\ (aq) + 2e^- \quad (4)$$

Затем гидроксид железа (II) окисляется в оксиды железа с образованием зеленого гидратированного магнетита: $FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O$:

$$6Fe(OH)_2\ (aq) + O_2\ (aq) \rightarrow \rightarrow 4H_2O(1) + 2FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O. \quad (5)$$

Гидратированный магнетит нестабилен и разлагается на черный магнетит:

$$FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s) \rightarrow FeO \cdot Fe_2O_3\ (s) + H_2O. \quad (6)$$

В присутствии кислорода черный магнетит окисляется в стабильный красно-коричневый гидратированный гематит ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$), называемый ржавчиной.

$$4FeO \cdot Fe_2O_3\ (s) + 6O_2\ (aq) + 3H_2O \rightarrow \rightarrow 6Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s). \quad (7)$$

Общая реакция

$$4Fe\ (s) + 3O_2\ (aq) + 3H_2O\ (1) \rightarrow \rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O\ (s). \quad (8)$$

Движущей силой коррозии (рис. 14) для стали является разность потенциалов между анодным и катодным участками. Общий потенциал электрического равновесия гальванического элемента определяется разницей стандартных потенциалов между анодной и катодной реакциями полуэлемента: E^0_{Ox} и E^0_{Red} соответственно.

3.3. Факторы деструкции

В атмосферных условиях покрытие подвергается воздействию различных факторов, что приводит к образованию косметических дефектов: потере блеска, изменению цвета и мелению. Большинство

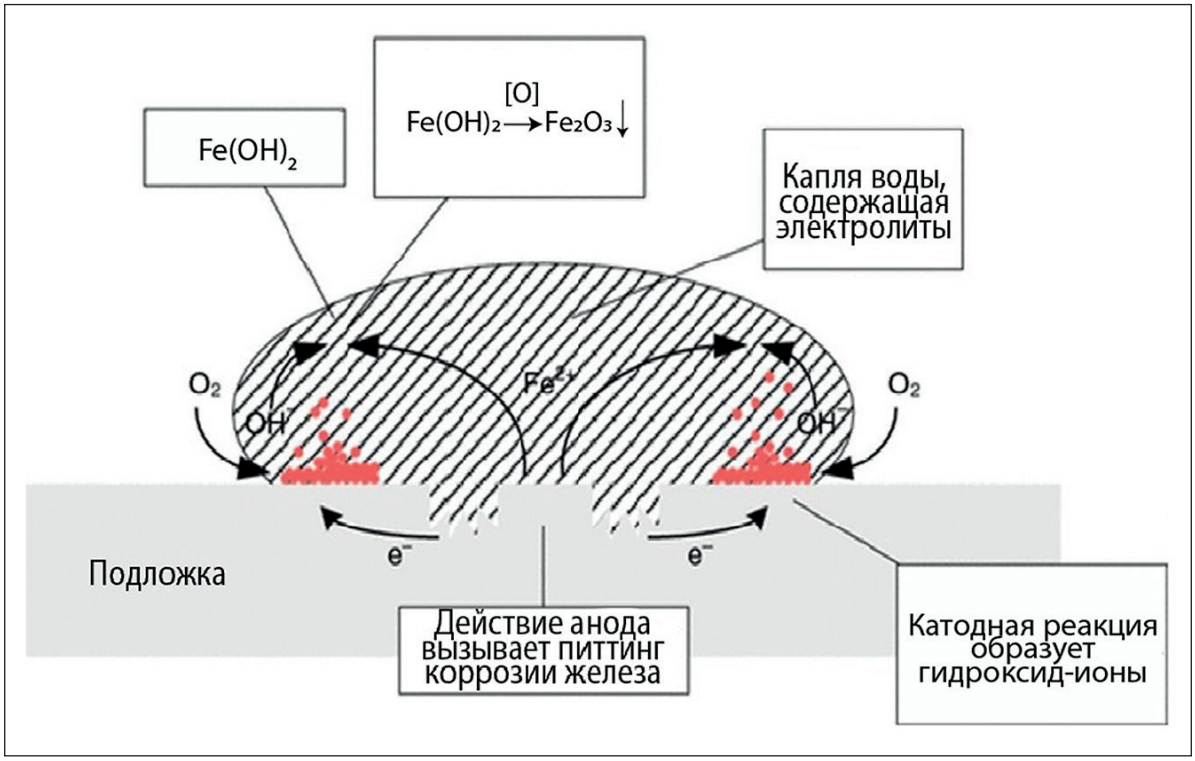

Рис. 14. **Схема коррозионных процессов на стали**

косметических дефектов вызвано разложением связующего под действием УФ-излучения [227–228]. Более серьезными проблемами являются трещины в покрытии и потеря адгезии.

Поскольку снижение адгезии происходит до наступления коррозии, важно знать механизмы, ответственные за снижение адгезии между органическим покрытием и металлической подложкой [229]. Например, в атмосферных условиях цинковые покрытия могут отслаиваться из-за несоблюдения условий отверждения, что в дальнейшем приводит к нарушению защиты от коррозии. Механизм, ответственный за снижение адгезии, – «мокрая адгезия», т.е. адгезия покрытия к металлической подложке в присутствии воды [229]. Водяные пары в конечном итоге всегда проникают через покрытие. Молекулы воды на границе раздела между покрытием и подложкой связывают ионы водорода и нивелируют силы сцепления между покрытием и оксидами металлов [230]. Выдерживать гидролиз в течение длительного периода времени пригодно небольшое количество полимер-металлических связей. Таким образом, во влажной среде адгезия слабеет, на границе раздела образуется раствор электролита, в результате коррозионные процессы инициируются. С помощью методов FTIR-MIR определена толщина безопасного слоя воды, а также обнаружено, что этот слой накапливается с увеличением потенциала. Для ингибирования накопления воды необходимо несколько слоев покрытия [231–233]. Процесс накопления воды на границе раздела покрытие-подложка подтвержден исследованиями водопоглощения в прилежащих и свободных пленках. Водопоглощение в прилежащих областях покрытий выше, чем в соответствующих свободных пленках [234]. Основываясь на величинах энергий взаимодействий металл-адгезия (в диапазоне около 25 кДж/моль или ниже) и взаимодействий металл-вода (энергии связи в диапазоне 40–65 кДж/моль), вытеснение покрытия водой вполне вероятно [235].

3.4. Типы деструкции

Нитевидная коррозия

В условиях влажной атмосферы актуальным механизмом деградации металлов с органическим покрытием является нитевидная коррозия. Хотя нитевидная коррозия часто наблюдается на алюминиевых деталях с органическим покрытием, исключение не составляет и магниевая и холоднокатаная сталь. Нитевидная коррозия обычно возникает на микроскопических царапинах или дефектах покрытия. Нитевидная коррозия обычно является поверхностной и представляет собой тонкие нитевидные налеты, особенно прогрессирующие под покрытием вдоль поверхности. Коррозионные нити можно рассматривать как коррозионную головку, за которой следует хвост, представляющий собой пористые продукты коррозии. Кислород действует исключительно на активную коррозионную головку [236]. Наблюдается дифференциальная аэрация, поскольку кислород и вода поступают к коррозионной головке посредством диффузии через пористый хвост [237]. Единственным эффективным методом предупреждения нитевидной коррозии является обезвоживание головки нити путем снижения относительной влажности примерно до 60%. Несколько слоев покрытия, низкое пропускание водяного пара и наличие ингибиторов замедляют, но не предотвращают нитевидную коррозию в средах, где влажность невозможно контролировать.

Деградация погруженных покрытий

В системах с погруженными органическими покрытиями наиболее важными и распространенными формами видимого разрушения являются образование пузырей и расслоение (рис. 15). Различное взаимодействие гидроксильных ионов с металлической подложкой приводит либо к катодному вздутию

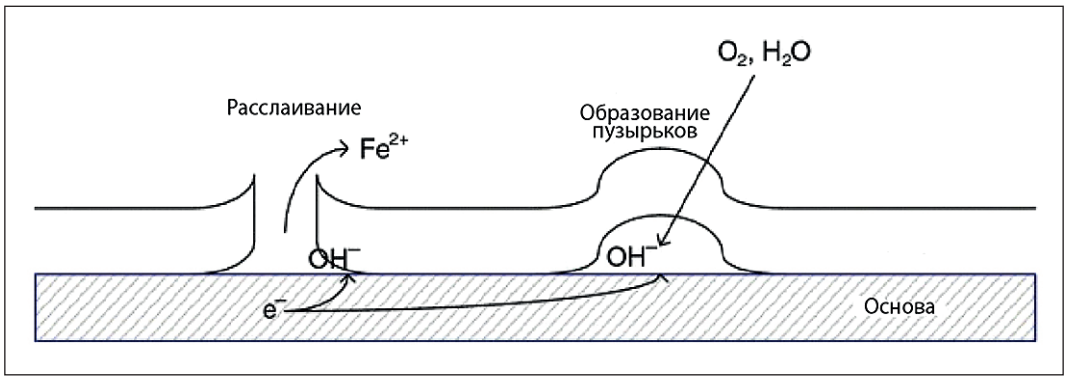

Рис. 15. **Эскиз расслоения и вздутия покрытия**

либо к катодному расслоению. Образование пузырей является результатом осмотического давления ввиду высокой растворимости в воде продуктов катодной реакции. В результате образующейся щелочной среды благодаря наличию продуктов катодной реакции происходит разрыв связей на границе раздела покрытие-металл, что приводит к расслоению.

Щелочная среда под отслаивающимся покрытием и в катодных областях связана с основными коррозионными процессами стали в морской воде. Наличие дефектов в защитном покрытии способствует более активному воздействию окружающей среды на сталь. Так происходит образование гальванической ячейки с анодной и катодной областями. Сталь растворяется в анодной области. Затем окисленные металлы катализируют катодные реакции, анодная реакция уравновешивается катодной реакцией. В естественных условий катодная реакция будет включать восстановление кислорода [238].

Катодное расслоение

В случае антикоррозионного покрытия с дефектами на практике коррозия начинается гораздо быстрее, чем для бездефектного покрытия. Основные принципы катодного расслоения в целом описаны [239]. Считают, что причиной расслоения является так называемая катодная поляризация, вызванная действием гидроксильных ионов или химическими реакциями. Необходимые для деполяризации катодной области кислород и вода проникают через покрытие или вдоль границы раздела покрытие-подложка. Затем диффундирующий к поврежденным участкам кислород вступает в реакцию окисления $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$.

Исследователями большое внимание уделено изучению транспорта воды, кислорода и катионов через органические покрытия на металлическую подложку. Показано, что типичные органические покрытия достаточно проницаемы для воды и кислорода, поэтому не способны ингибировать расслоение [240–241]. Перенос ионов из окружающей среды на поверхность металла осуществляется по дискретным каналам с низким сопротивлением в покрытии. Присутствие ионов щелочных металлов и OH-ионов приводит к образованию щелочной среды под покрытием и в катодном участке pH может достигать 12–14 [242–243]. Диффузия катионов для нейтрализации заряда гидроксильных ионов обычно является лимитирующим этапом. Доказано, что перенос катионов вдоль границы раздела покрытие-сталь происходит намного быстрее, чем через покрытие. Расслоение покрытия контролируется диффузией катионов [244–245]. Подтверждает эту гипотезу зависимость скорости расслоения от гидратированного размера катионов. Однако незначительное изменение скорости расслоения в более стабильном эпоксидном покрытии, модифицированном силаном, показало, что сам по себе межфазный транспорт не определяет скорость катодного расслоения.

В катодных блистерах под покрытием высокая щелочность является причиной деградации покрытия. Однако точный механизм пока не описан. Механизмы потери сцепления между подложкой и покрытием в щелочной среде согласно работе [246] можно разделить на три группы: «уменьшение оксидного слоя, химическая деградация полимера, межфазный перелом». Первый путь образования областей расслоения является предпочтительным [246]. На основании этого механизма описана деградация эпоксидных и термоотверждаемых акриловых и полибутадиеновых покрытий на катодно-защищенной стали. Согласно диаграмме, такие процессы вполне предсказуемы для железа при pH = 14 и при катодных потенциалах менее 960 мВ СВП. Измерения *in situ* рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией подтвердили, что в щелочной среде значительное восстановление оксида железа возможно только при катодных потенциалах менее 800 мВ СВП [247–248].

Полимерная матрица покрытия при эксплуатации подвергается химическому разложению, при повышенных pH происходит омыление. Подобные случаи описаны с покрытиями на основе полиэтилена, полибутадиена и эпоксидных смол на катоднозащищенной стали [249]. Например, разложение путем омыления в случае покрытий из полибутадиена ускоряется при pH > 11,8. Исследования показали, что область первоначального разрушения полимерного покрытия находится вблизи поверхности металла [250]. Образующиеся при восстановлении кислорода радикалы HO_2^-, OH и O_2^- являются основным фактором деградационных процессов органического слоя [251].

Схемы механизмов катодного расслоения, основанные на литературных данных, приведены на рис. 16.

В области дефекта в связи с присутствием воды, кислорода, ионов электролитов устанавливается гальваническая ячейка. Образующиеся гидроксильные ионы приводят к высокой щелочности в области и снижению сцепления между подложкой и покрытием. Возникшие в процессе отверждения смолы внутренние напряжения в покрытиях, перепады температур и влажности ускоряют коррозионные процессы. Скорость расслоения в щелочных растворах [252–253] значительно ниже.

Повреждение и последующее отслоение органического покрытия от металлической поверхности происходит различными способами: в виде катодно-

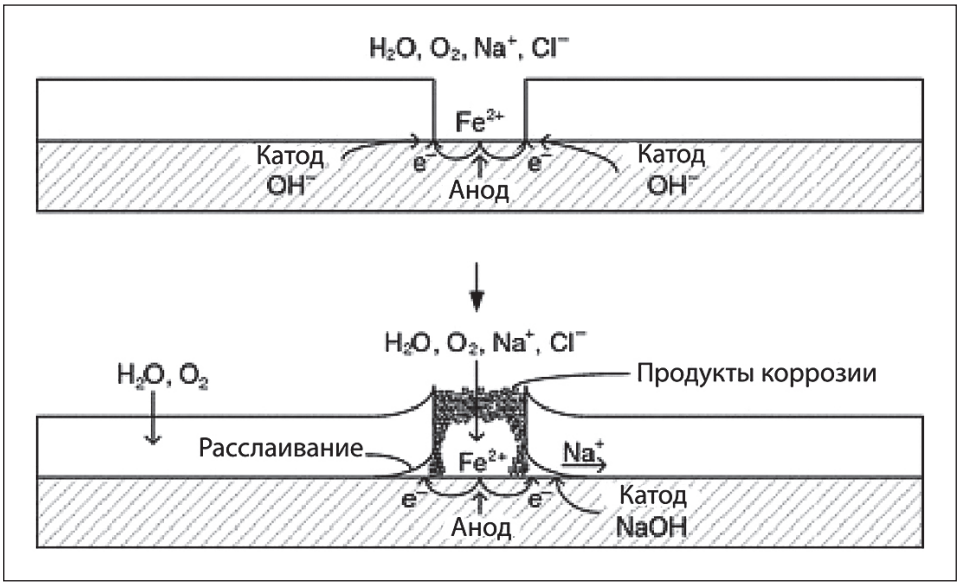

Рис. 16. **Расслоение покрытия после повреждения**

го расслоения, в виде нитевидной коррозии или при совместном протекании этих процессов. Расслоение органических покрытий на поверхностях, обработанных хроматом или фосфатом, является следствием растворения конверсионного слоя. Доказано, что расслоение эпоксидного покрытия на хроматированной стали вызвано разрушением самого конверсионного покрытия. Катодные условия под эпоксидным покрытием восстанавливают $Cr^{6+} \rightarrow Cr^{3+}$. В случае фосфатных конверсионных покрытий протекают аналогичные процессы [254]. Экспериментальные данные подтверждают уменьшение отслаивания покрытия в катодных условиях в присутствии фосфатсодержащих пигментов [255]. Однако характеристики фосфатно-пигментированных покрытий в катодных условиях обеспечивают стойкость связующего к вытеснению щелочи на границе раздела покрытие-сталь. Снижение скорости расслоения в присутствии фосфатсодержащих пигментов обосновано осаждением фосфатного слоя на катодных участках и поляризацией катодной реакции [256]. Среди факторов катодного расслоения покрытий также можно выделить деградацию полимеров в результате окислительных процессов и взаимодействие с активными промежуточными продуктами, такими как H_2O_2 и HO_2, радикалами OH. Утверждается, что их действие более разрушительно для покрытия, чем образующаяся щелочная среда.

Катодное образование пузырей

Образование вздутий служит первым видимым признаком неполноценной защиты антикоррозионного органического покрытия. Образование пузырей на бездефектных покрытиях описывается следующими стадиями: набухание, расширение из-за набухания, образование газа и последующие осмотические процессы [257]. Именно водорастворимые загрязнители на поверхности субстрата ответственны за образование осмотических пузырей. Проведены исследования по определению предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, в исследовательских работах встречаются значительные расхождения пределов допустимого количества водорастворимых загрязняющих веществ на подложке до нанесения покрытий.

Принципиальная модель деградации бездефектных органических покрытий на стали в нейтральном электролите предполагает образование катодного вздутия после переноса ионов по проводящим путям. Предполагается, что водорастворимые катионы диффундируют через покрытие в низкосшитых или низкомолекулярных областях. Деградацию бездефектного покрытия при действии нейтрального электролита можно обобщить следующими стадиями (на рис. 17 номер в кружке соответствует номеру стадии):

1 стадия – проводящие пути развиваются под влиянием воды в гидрофильных областях или областях с низкой плотностью сшивки;

2 стадия – ионы электролита диффундируют по проводящим путям к поверхности подложки;

3 стадия – образование анодных участков на поверхности подложки;

4 стадия – образование катодных участков на периферии путей;

5 стадия – ионы Na^+ диффундируют к катодным участкам для нейтрализации заряда вдоль границы раздела покрытие-подложка;

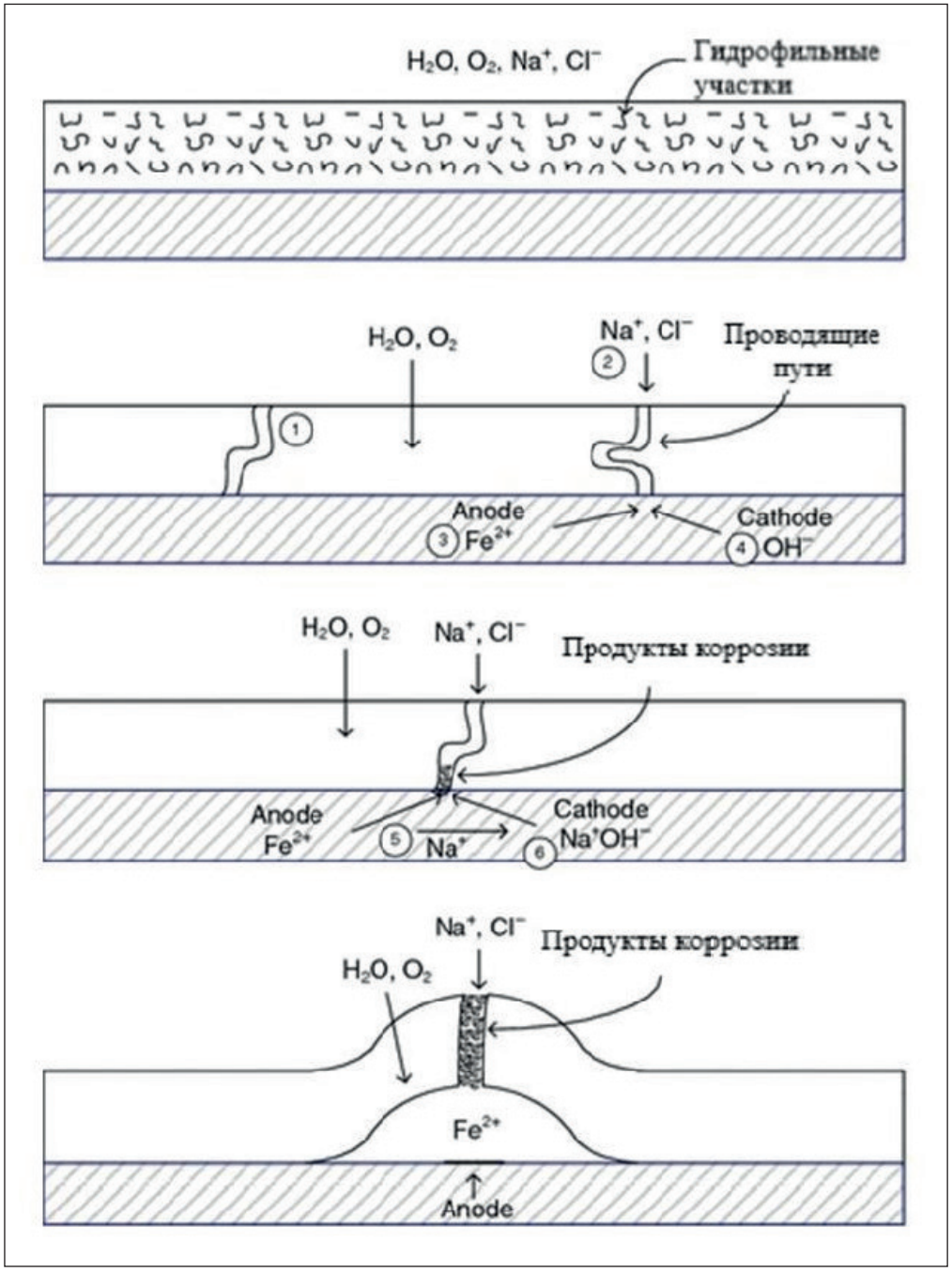

Рис. 17. **Механизм деструкции бездефектных органических покрытий на стали в среде нейтрального электролита**

6 стадия – щелочность среды способствует катодному расслоению;

7 стадия – вода проходит через покрытие к катодным участкам за счет гигроскопичности материала на катодных участках;

8 стадия – пузыри увеличиваются и сливаются.

Однако в исследованиях не установлен механизм и причины образования катодных пузырей, их взаимосвязь с определенными участками на границе раздела покрытие-подложка, такими как межфазные микропустоты или дефекты в структуре поверхности подложки. Катодные пузыри могут образоваться рядом с открытым участком и на поврежденных участках покрытия. Поврежденный участок может быть дефектом покрытия (поры и микропустоты) или участком с низкой плотностью сшивки. Жидкость в нейтральных блистерах слабокислая или нейтральная, в то время как жидкость в катодных блистерах сильно щелочная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защитные покрытия – одна из самых эффективных, экономичных и простых стратегий предотвращения ущерба. В частности, антикоррозионная защита покрытий основана на барьерных свойствах, самовосстановлении, активном ингибировании коррозии, анодной пассивации и катодной защите. Полимерные покрытия защищают большую часть металла по тоннажу по сравнению с другими антикоррозионными методами. Первоначально покрытия были разработаны исключительно для защиты металлов и сплавов от коррозии, в настоящее время существует потребность в разработке покрытий, обеспечивающих широкий спектр качественных показателей и минимальное негативное воздействие на окружающую среду, что требует комплексного подхода к проектированию и производству покрытий. В совокупности с этим необходимо развитие современных методов определения характеристик покрытий по их морфологии, химическим и физическим свойствам и коррозионному поведению. К тому же подавляющее большинство исследований в разработке покрытий проводилось *ex situ*. В связи с этим для полного исследования свойств и механизмов покрытий в идеале должно быть обеспечено синергетическое использование методов исследования свойств и механизмов покрытий, а также для получения глубокого механистического понимания в различных масштабах длины – изучение поведения покрытия *in situ*. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение причинно-следственных связей между свойствами поверхности металла, проникновением влаги и скоростью коррозии для разработки многомасштабной, количественной и имитационной модели оценки антикоррозионных свойств и долговечности органических покрытий.

Нанотехнологии обладают большим потенциалом для создания высокоэффективных антикоррозионных покрытий: повышают адсорбцию/поглощение воды, термомеханические характеристики, адгезию к подложке, устойчивость к ультрафиолетовому излучению и химическую стойкость, износостойкость, электропроводность, плотность сшивания, однородность и биосовместимость. Использование наноматериалов в органических покрытиях значительно улучшает барьерные свойства за счет уменьшения пористости и увеличения извилистого пути для коррозионно-активных веществ. Разработка экологически чистых полимеров, наночастиц и ингибиторов коррозии является перспективным решением для создания более экологичных нанокомпозитных органических покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

225. Kalenda P., Kalendova A., Mosner P., Poledno M. Efficiency of Anticorrosive Pigments Based on Modified Phosphate. *Macromol. Symp*. 2002; 187: 397.

226. ГОСТ 34667.5-2021. Материалы лакокрасочные. Защита стальных конструкций от коррозии при помощи лакокрасочных систем

227. Valet A. Light Stabilizers for Paints. Vincentz Verlag, Hanover. 1997.

228. Funke W. Towards a Unified View of the Mechanisms Resposible for Paint Defects by Metallic Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1985; 24: 343.

229. Ochs H., Vogelsang J., Meyer G. Enhanced Surface Roughness of Organic Coatings due to UV-Degradation: An Unknown Surface of EIS-Artifacts. *Prog. Org. Coat*. 2003; 46: 182.

230. Funke W. Blistering of Paint Films and Filliform Corrosion. *Prog. Org. Coat*. 1981; 9: 29.

231. Nguyen T., Byrd E., Bentz D. Quantifying Water at the Organic Film/Hydroxylated Substrate Interface. *J. Adhes*. 1995; 48: 169.

232. Leidheiser H. Towards a Better Understanding of Corrosion Beneath Organic Coatings. *Corrosion*. 1983; 39: 189.

233. Nguyen T., Byrd E., Bentz D., Lin C. In Situ Measurement of Water at the Organic Coating/Substrate Interface. *Prog. Org. Coat*. 1996; 27: 181.

234. Funke W., Haagen H. Empirical or Scientific Approach to Evaluate the Corrosion Protective Performance of Organic Coatings. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1978; 17: 50.

235. Linossier I., Gaillard M., Romand M. A Spectroscopic Technique for Studies of Water Transport Along the Interface and Hydrolytic Stability of Polymer/Substrate Systems. *J. Adhes*. 1999; 70: 221.

236. Ruggeri R.T., Beck T.R. An Analysis of Mass-Transfer in Filiform Corrosion. *Corrosion*. 1983; 39: 452.

237. Nguyen T., Hubbard T.B., Pommersheim J.M. Unified model for the Degradation of Organic Coatings on Steel in a Neutral Electrolyte. *J. Coat. Technol*. 1996; 68: 45.

238. Deflorian F., Rossi S. The Role of Ions Diffusion in the Cathodic Delamination Rate of Polyester Coated Phosphatized Steel. *J. Adhes. Sci. Technol*. 2003; 17: 291.

239. Dickie R.A. Chemical Studies of the Organic Coating/Steel Interface After Exposure to Aggressive Environments. *ACS Symposium Series*. 1986; 322: 136.

240. Lyon S.B., Philippe L., Tsuousoglou E. Direct Measurements of Ionic Diffusion in Protective Organic Coatings. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2006; 23.

241. Koehler E.L. The Mechanism of Cathodic Disbondment of Protective Organic Coatings – Aqueous Displacement at Elevated pH. *Corrosion*. 1984; 5.

242. Parks J., Leidheiser H. Ionic Migration through Organic Coatings and Its Consequences to Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1986; 25: 1.

243. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 2. *J. Mater. Sci*. 1984; 2259.

244. Leidheiser H., Granata R.D. Ion Transport through Protective Polymeric Coatings Exposed to an Aqeous Phase. *J. Res. Dev*. 1988; 582.

245. Grundmeier G., Stratmann M. Adhesion and De-Adhesion Mechanisms at Polymer/Metal Interfaces: Mechanistic Understanding Based on In-Situ Studies of Buried Interfaces. *Annu. Rev. Mater. Sci*. 2005; 35: 571.

246. Ritter J.J. Ellipsometric Studies on the Cathodic Delamination of Organic Coatings on Steel and Iron. *J. Coat. Technol*. 1982; 54: 51.

247. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 1. *J. Mater. Sci*. 1983; 18: 2987.

248. Murase M., Watts J.F. XPS Study of Coating Delamination from Non-Rinse Chromate Treated Steel. *J. Mater. Sci*. 1998; 8: 1007.

249. Watts J.F. Mechanistic Aspects of the Cathodic Delamination of Organic Coatings. *J. Adhes*. 1989; 73.

250. Hamade R.F., Dillard D.A. Cathodic Weakening of Elastomer-to-Metal Adhesive Bonds: Accelerated Testing and Modeling. *J. Adhes. Sci. Technol*. 2003; 17: 1235.

251. Pommersheim J.M., Nguyen T., Zhang Z., Hubbard J.B. Degradation of Organic Coatings on Steel: Mathematical Models and Predictions. *Prog. Org. Coat*. 1994; 25: 23.

252. Darwin A.B., Scantlebury J.D. The Behaviour of Epoxy Powder Coatings on Mild Steel under Alkali Conditions. *J. Corros. Sci. Eng*. 1999; 2.

253. Smith A.G., Dickie R.A. Adhesion Failure Mechenisms of Primers. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev*. 1978; 17: 42.

254. Sommer A.J., Leidheiser H. Effect of Alkali Metal Hydroxides on the Dissolution of Zinc Phosphate Conversion Coating on Steel and Pertinence to Cathodic Delamination. *Corrosion*. 1987; 43: 661.

255. Hernandez M.A., Galliano F., Landolt D. Mechanism of Cathodic Delamination Control of Zinc Aluminum. *Corros. Sci*. 2004; 46: 2281.

256. Furbeth W., Stratmann M. Investigation of the Delamination of Polymer Films from Galvanized Steel with the Scanning Kelvin Probe. *Fresenius J. Anal. Chem*. 1995; 353: 337.

257. de la Fuente D., Bohm M., Houyoux C., Rohwerder M., Morcillo M. The Settling of Critical Levels of Soluble Salts for Painting. *Prog. Org. Coat*. 2007; 58: 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вихарева Ирина Николаевна – кандидат химических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, vikharevain@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5681-2767

Антипин Вячеслав Евгеньевич – кандидат технических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, antipinve@susu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4337-1760

ВКЛАД АВТОРОВ

Вихарева И.Н. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста

Антипин В.Е. – итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 06.02.2024.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234

CC BY 4.0

The effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material

Marina V. Morozova
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
Corresponding author: e-mail: m.morozova@narfu.ru

ABSTRACT

Introduction. To restore and develop the Solovetsky Islands road network concrete slabs could be used. Currently, compositions with additives of industrial waste, including micro- and nanoscale, are being actively introduced to improve the performance characteristics of the road slabs. For the Arkhangelsk region, saponite-containing waste from the mining industry could be used as a material. At the same time, one of the ways to accelerate the process of gaining strength of composites is steaming. However, studies related to the effect of temperature and humidity treatment on the hardening process of a composite with a highly dispersed saponite-containing material (SCM) have not been previously studied. It is known that the process of moisture sorption with a finely dispersed additive allows controlling structure formation during concrete hardening, improving its operational characteristics. However, under conditions of high humidity, the quantitative content of tempering water, calculated based on the value of water absorption of the SCM, can significantly change and affect the process of gaining the strength of the composite. Therefore, **the purpose of this research** is to study the effect of temperature and humidity treatment on the strength gain of fine-grained concrete with the addition of SCM. It has been established that the accelerated method of concrete hardening has only a positive effect on the formation of a strong and dense structure. However, in the case of using highly dispersed saponite-containing material as an additive, the opposite effect (decrease in strength) associated with sorption properties and features of its structure can be observed. **Methods and Materials.** The SCM recovered from the recycled water was dried to constant weight and dispersed on a planetary ball mill. Particle size was determined by dynamic and electrophoretic light scattering, and specific surface area was determined by nitrogen sorption (BET theory). The strength of samples of fine-grained concrete of the control and experimental (with the addition of SCM) compositions was gained in two ways: under normal conditions and by an accelerated method using steaming. Strength tests of cube samples with dimensions of 70×70×70 mm were carried out on an automatic test press according to GOST 10180. The microstructure of the samples was examined by scanning electron microscopy. **Results and Discussion.** The separated, dried and ground saponite-containing material (powder) had an average particle size of 445±40 nm and a specific surface area of 50 670±10 m^2/kg. In continuation of the studies, control (FGC) and test samples of fine-grained concrete (FGC_{scm}) were made. The amount of a highly dispersed additive was introduced into the concrete mixture based on previously obtained results of kinetic studies of the water absorption process of saponite-containing material. The determination of the strength characteristics of 1-FGC and 1-FGC_{scm}, hardening under normal conditions, was carried out on day 28. Samples of 2-FGC and 2-FGC_{scm}, a day after sealing with water, were placed in a steaming chamber. After the expiration of the holding time, they were gradually cooled and their strength characteristics were determined. It has been established that the accelerated method of gaining strength of fine-grained concrete, by steaming, has a positive effect only on control samples. For a composite with the addition of SCM, temperature and humidity treatment has the opposite effect. Thus, the dynamics of strength gain of 1-FGC and 1-FGC_{scm} are of the same type. At the initial moment of time, an active site of strength gain is observed, but on day 7, the compressive strength of the samples of the experimental composition is 40% higher than that of the control one. At the accelerated curing method in the first two hours (isothermal heating stage), an active strength increase was observed in 2-FGC and 2-FGC_{scm}. The subsequent curing of the control specimens has a linear dependence with a gradual increase in strength to the design strength in six hours. For 2-FGC_{scm}, after two hours of steaming, the strength sharply begins to decrease, and after six hours – visible destruction of the concrete structure occurs. Consequently, prolonged temperature and humidity exposure of concrete with highly dispersed SSM admixture leads to a decrease in the strength characteristics of the specimens. Most likely, it is connected with moisture oversaturation of the composite structure. Therefore, in continuation of the research, electronic photographs were taken of the microstructure of concrete after three hours of holding in the steaming chamber. Thus, the microstructure of 2-FGC_{scm} is mainly represented by spongy particles, and the number of formed needle-like (tobermorite crystals) – decreased significantly, compared to the control. A significant formation of voids in the experimental sample is also observed, which can be attributed to defects in the structure of the obtained composite. In addition,

© Morozova M.V., 2024

saponite has a three-layer crystalline structure, and the distance between its packets can easily change, since only Van-der-Waals forces condition the connection between them. This can lead to significant swelling of SCM under the action of moisture and create excessive pressure in the microstructure of hardening fine-grained concrete, causing the destruction of the internal structure with a subsequent decrease in strength characteristics. Therefore, in continuation of the research, the following experiment was performed: a suspension of saponite-containing material was placed in a glass-measuring cylinder and water was added to it. The swelling data obtained showed that all samples of highly dispersed SCM actively absorbed water. Thus, after 30 minutes the material increased in volume by 3.6 times, and after three hours – by 5.5 times, compared to the original. **Conclusion.** An important practical conclusion of the presented experimental results is the following provision: in the case of using a highly dispersed addition of saponite-containing material to obtain fine-grained concrete, it is impossible to change the curing conditions of the samples from normal to accelerated method by steaming them. In the latter case, after exposure of experimental samples to temperature and humidity for two to three hours there is a loss of their strength properties. This fact is associated with the processes of saturation of saponite particles with water and their subsequent significant swelling.

KEYWORDS: saponite-containing material, steaming, temperature and humidity treatment, fine-grained concrete, highly dispersed additive, swelling, compressive strength.

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out with the financial support of RCF within the framework of the scientific project 23-13-20013 "Soil concrete based on an organomineral reactive binder to strengthen the historical road structures of the Solovetsky Archipelago".

FOR CITATION:
Morozova M.V. The effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material. *Nanotechnology in Construction.* 2024; 16(3): 227–234. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234. – EDN: DXLKDK.

INTRODUCTION

The Solovetsky Islands are the most popular and sought-after historical and cultural complex of the Arkhangelsk region [1, 2]. In order to preserve and develop the cultural and natural heritage of the archipelago, the Government of the Russian Federation, by Order No. 163-r dated 05.02.2016, approved an action plan, which is being implemented with the support of the Ministry of Construction of the Russian Federation and includes the modernization of the engineering, housing and communal and social infrastructure of the island.

An important component for the implementation of this plan is the development and restoration of the road network of the archipelago, associated with the reconstruction and rehabilitation of existing facilities, construction of new permanent and temporary transport highways [3]. For example, concrete slabs can be used to restore and develop the road network of the Solovetsky Islands. These prefabricated, constructed from individual products, road pavements are manufactured in factories with observance of technological rules and concrete care regimes, ensuring their necessary quality. The advantage of reinforced concrete slabs is the possibility of traffic movement immediately after the pavement construction [4, 5].

Currently, to improve the performance characteristics of concrete products, compositions with additives of industrial wastes [6–8], including micro- and nano-level [9–14], are actively introduced.

An important economic component of this approach is associated with the use of local (locally distributed) raw material base. For example, for the Arkhangelsk region as such a material can be used saponite-containing waste from the mining industry. The effectiveness of its use in compositions with cement has been proved by a number of studies. Thus, in [15, 16] it was found that when obtaining fine-grained concrete, the addition of highly dispersed saponite-containing material (SCM), reduces binder consumption due to the chemical transformation of compounds that are part of rock minerals [17, 18], and increases performance characteristics such as strength, frost resistance and water resistance. Therefore, the possibility of using fine-grained concrete with SCM additive for the production of road slabs is of particular importance from both economic (reduction of cement consumption) and environmental (utilization of industrial waste) points of view. Steaming is one of the ways to accelerate the strength gain process of composites. This makes it possible to significantly reduce the production time of concrete products without reducing their quality and increase the volume of products. However, studies related to the effect of temperature and humidity treatment on the hardening process of a composite with the addition of saponite-containing material have not been studied before. At the same time, it was established [19] that the sorption of moisture by a highly dispersed SCM, which controls the structure formation during concrete hardening, makes it possible to improve the performance characteristics of the composite. In addition, when designing the composition of the product, the quantitative content of the mixing water is calculated based on the amount of water absorption of saponite-containing ma-

terial, which optimizes the content of the aqueous phase in the system. However, in conditions of high humidity, this ratio can change significantly and affect the process of gaining strength of the composite.

Therefore, **the purpose of this work** is to study the effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material.

Studies [20] have shown that under normal hardening conditions, the formation of tricalcium silicate (C_3S) leads to the formation of weakly crystalline calcium silicate hydrates (C–S–H) followed by the formation of portlandite [21, 22]. An increase in ambient temperature causes the bonds in C–S–H to become unstable [23], and at 70°C – C_2SH crystals are formed, the accelerated formation of which leads to a decrease in the mechanical properties of the composite. This negative effect can be compensated by reducing the Ca/Si ratio, which is achieved by increasing the microdisperse component in the concrete mixture.

In addition to calcium hydrosilicate crystals, which are the main strength carriers, fibrous tobermite-like compounds are also formed in concrete. Currently, there are many works devoted to the artificial synthesis of tobermorite crystals [20, 24]. Therefore, the effect of high temperatures on the processes of its formation is well studied. It has been established that crystal formation occurs at 160–180°C, and heating to 300°C turns tobermorite into riverside. In the case of prolonged treatment with saturated steam (on the first day of concrete hardening), tobermorite at a temperature of 15°C is replaced by xonotlite [25]. Therefore, the accelerated method of concrete hardening should have only a positive effect on the formation of a strong and dense structure. However, if a highly dispersed saponite-containing material is used as an additive the opposite effect (decrease in strength) may be observed, associated with sorption properties and features of its structure.

METHODS AND MATERIALS

MATERIALS: To conduct research, experimental samples of saponite-containing suspension were taken from a tailings dump at a depth of one meter. Then, SCM was isolated from recycled water by the method of electrolyte coagulation based on the transfer of highly dispersed solid phase particles to a state close to isoelectric.

For the manufacture of samples of fine-grained concrete, portland cement CEM II/A-S 32.5N from the manufacturer "Eurocement" was used as a binder. The filler is medium – sized sand from the "Kenitsy" deposit, Arkhangelsk region. The sealing water is tap water, conforming to GOST 23732-2011.

METHODS: The saponite-containing material isolated from recycled water was dried in a "BINDER" drying cabinet to a constant mass at a temperature of 105°C. To obtain a highly dispersed solid phase, a mechanical dispersion method and a planetary ball mill "Retsch PM100" were used. The grinding of the material was carried out for 90 minutes at a rotor rotation speed of 420 rpm using grinding media in the amount of 20 pieces made of carbide tungsten (balls with a diameter of 20 mm).

The particle size was determined using the Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers ("DelsaNano") submicron particle Size analyzer by measuring dynamic and electrophoretic light scattering. The resulting highly dispersed sample was characterized by nitrogen sorption on the "Autosorb-iQ-MP" analyzer according to the value of the specific surface of the S_{sp} (BET theory).

The modulus of size and the true density of sand were determined according to GOST 8735-88, and the true density of saponite-containing material according to GOST 21216-2014. The chemical composition of the SCM was determined on an X-ray fluorescence analyzer "Metexpert".

The production of samples of fine-grained concrete of control and experimental (with the addition of SCM) compositions was carried out according to standard methods. The strength set of the samples was determined in two ways: under normal conditions (a cabinet chamber "KNT-60" was used to store concrete and cement samples with automatic temperature and humidity maintenance) and by an accelerated method using steaming (universal steaming chamber "KUP-1" according to GOST 9758-86 and GOST 25485-89).

Strength tests of cube samples with a size of 70×70×70 mm were carried out on an automatic test press "TP-1000" (compressive strength according to GOST 10180). The compressive strength was determined as the arithmetic mean of three parallel measurements.

To study the microstructure of fine-grained concrete samples by scanning electron microscopy, a Zeiss Sigma VP electron microscope (CCU "Arctic" at the M.V. Lomonosov NArFU) was used.

RESULTS AND DISCUSSION

The isolated, dried and crushed saponite-containing the material (in powder form) had an average particle size of 445±40 nm and a specific surface area of 50 670±10 m^2/kg.

The true densities of sand (modulus of size $M_k = 2.21$) and SCM were 2640 kg/m^3 and 2630 kg/m^3, respectively.

A certain elemental composition (Table 1) of the saponite-containing material, and in terms of oxides, showed that the main components of the analyzed sample are oxides of silicon, magnesium and iron.

From the presented data, it follows that saponite-containing material does not contain elements harmful

Table 1
The elemental composition of SCM and in terms of oxides

Element	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Sr
Content, %	22.00	4.82	46.89	2.21	5.45	1.19	0.23	0.35	16.30	0.39	0.17
Oxide	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**TiO_2**	**CrO**	**MnO_2**	**Fe_2O_3**	**NiO**	**SrO**
Content, %	19.80	4.94	54.43	1.44	4.14	1.08	0.36	0.77	12.65	0.27	0.11

to human health, the concentration of which exceeds the maximum-permissible values.

In continuation of the research, control (FGC) and experimental (with the addition of SCM) samples of fine-grained concrete (FGC_{scm}) were produced, the compositions of which are shown in Table 2. The amount of a highly dispersed additive that was introduced into the concrete mixture was calculated based on previously obtained results of kinetic studies of the water absorption process of saponite-containing material [19]. The uniformity of mixing of the highly dispersed mineral additive with the initial raw materials was achieved by sequential mixing of the binder and filler with the addition of SCM.

As noted above, the strength set of the samples was carried out in two ways: under normal conditions (1-FGC; 1-FGC_{scm}) and accelerated, by steaming (2-FGC; 2-FGC_{scm}) at a temperature of 80°C for six hours. The strength characteristics of 1-FGC and 1-FGC_{scm} were determined on day 28 (design age). Samples of 2-FGC and 2-FGC_{scm}, a day after sealing with water, were removed from metal molds and placed in a steaming chamber. After the expiration of the exposure time, the samples were gradually cooled, wiped with a dry cloth to remove excess moisture and their strength characteristics were determined.

The dynamics of the strength gain of fine-grained concrete of experimental and control compositions is shown in Figure 1.

Thus, the accelerated method of gaining strength of fine-grained concrete, by steaming, has a positive effect only on control samples. For a composite with the addition of SCM, temperature and humidity treatment has the opposite effect.

The results obtained (Fig. 1) showed that the dynamics of the strength gain of samples hardening under normal conditions is of the same type for both experimental and control formulations. At the initial moment of time (7 days), an active area of strength gain is observed. How-

Table 2
Composition of fine-grained concrete samples

Sample	Composition for the production of one m³ of concrete mix, kg				Density, kg/m³
	cement	sand	water	SCM	
Control, FGC	557	1380	283	–	2107
Experienced, FGC_{scm}	557	1358	390	22	2292

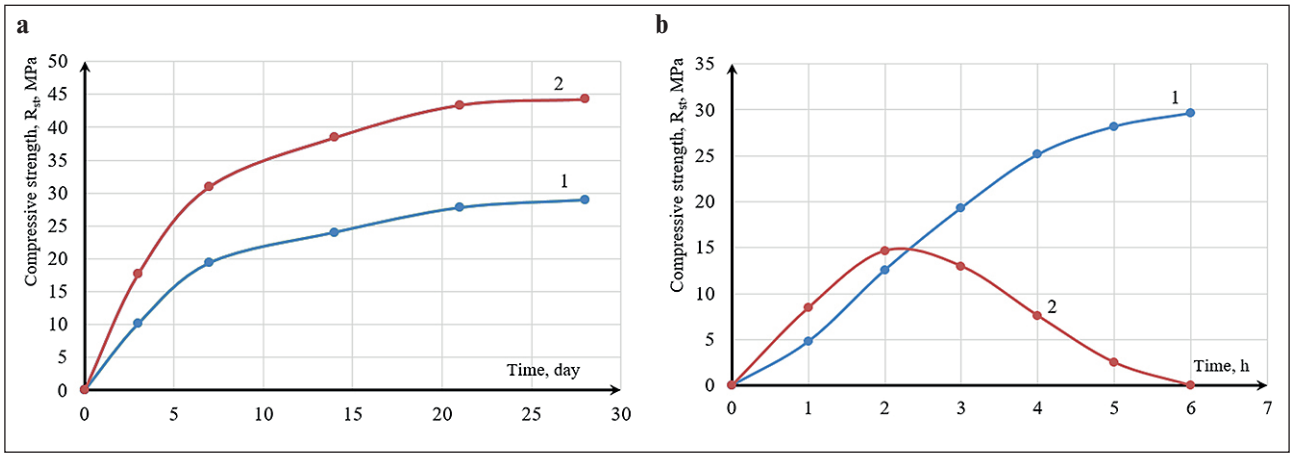

Fig. 1. **Dynamics of strength gain of fine-grained concrete samples during hardening:** a) under normal conditions; b) accelerated method (steaming); 1 – control composition; 2 – experimental composition

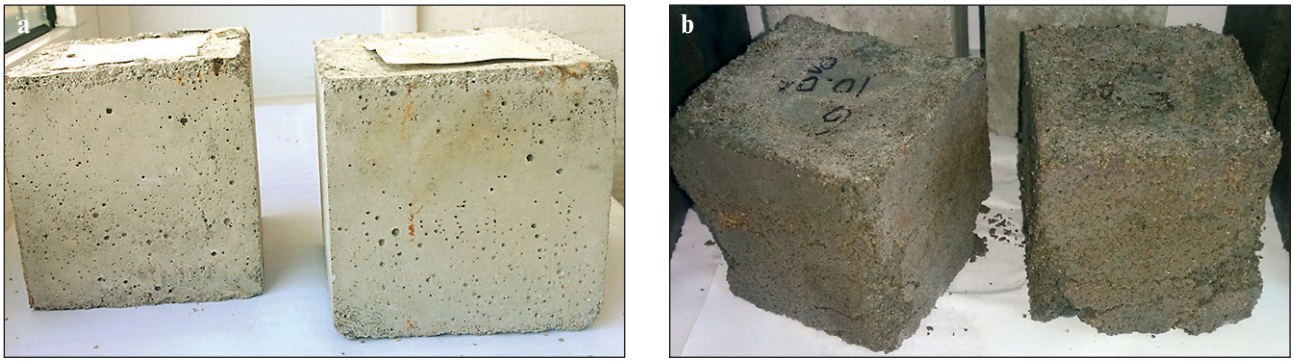

Fig. 2. **The appearance of the samples after steaming the composition:** a) control; b) experimental

ever, already on day 7, the compressive strength of the samples of the experimental composition is 40% higher than that of the control one. The design strength (for 28 days) for 1-FGC was 28.94 MPa (class B20), and for 1-FGC_{scm} – 44.28 MPa (class B30). It is worth noting that the introduction of a highly dispersed saponite-containing additive contributes to an increase in the strength class of concrete and leads to a reduction in the cement component.

With the accelerated hardening method, the dynamics of strength gain of 2- FGC_{scm} has an excellent character. So, in the first two hours (the isothermal heating stage), an active area of strength increase is observed in both samples. Moreover, for an experienced person, this area is characterized by greater intensity. The subsequent hardening of 2- FGC has a linear relationship with a gradual increase in strength to the design strength in six hours. For 2-FGC_{scm}, after two hours of steaming, the strength begins to decrease sharply, and after six hours, a visible destruction of the concrete structure occurs (Fig. 2).

Studies have shown that the isothermal heating stage has a positive effect on the strength set of 2-FGC_{scm} samples only in the initial period (within two hours). Prolonged steaming of this concrete leads to a decrease in the strength characteristics of the prototypes, which is most likely due to moisture saturation of the composite structure.

In order to explain the sharp decrease in the strength of concrete with highly dispersed saponite-containing admixture, photographs were taken of the microstructure of the samples after three hours of conditioning in the steaming chamber "KUP-1" (Fig. 3).

Scanning electron microscopy (SEM) of the composites, which gained design strength after 28 days, showed that the structure of the experimental and control samples is represented in the form of conglomerates of particles and hydrosilicate neoplasms, the size of which varies from 2 to 20 microns. In both materials, there are spongy, with developed microporous surface, and needle-like particles. Moreover, the number and length of the latter in the structure of the experimental sample increases almost 2 times compared to the control sample. Additional formation of needle-shaped crystals indicates the presence of submicrocrystals of hydrosilicates of the tobermorite group, which are formed in the presence of highly dispersed saponite-containing additive and play the role of an additional binder. After temperature and humidity treatment of fine-grained concrete with high-dispersed admixture, its microstructure was represented mainly by spongy particles, and the number of formed needles – significantly decreased compared to the control one. There is also observed a significant formation of voids in the experimental sample, which can be attributed to defects in the structure of the obtained concrete.

It is known that saponite has a three-layer crystalline structure, and the distance between its packets can easily change, since the connection between them is conditioned only by van der Waals forces. This fact can lead to significant swelling of highly dispersed clay powders under the action of moisture (water).

Such swelling of fine mineral admixture particles creates overpressure in the microstructure of the curing composite. This process causes the destruction of the internal structure of fine-grained concrete with SCM and leads to a decrease in its strength characteristics during steaming.

In the continuation of research to confirm the above hypothesis, the following experiment was performed, a 2 g weight of saponite-containing material was placed in a glass-measuring cylinder with a volume of 50 cm^3 and 20 ml of water was added. The obtained reaction mixture was intensively stirred by shaking and allowed to stand for 30, 90, 180 min (Table 3).

The obtained data (Table 3) showed that all samples of highly dispersed saponite-containing material actively absorbed water. Thus, after 30 minutes the material increased in volume by 3.6 times, and after three hours – by 5.5 times, compared to the initial one.

CONCLUSION

An important practical conclusion that can be made because of the presented experimental results is the fol-

The control structure **Experienced personnel**

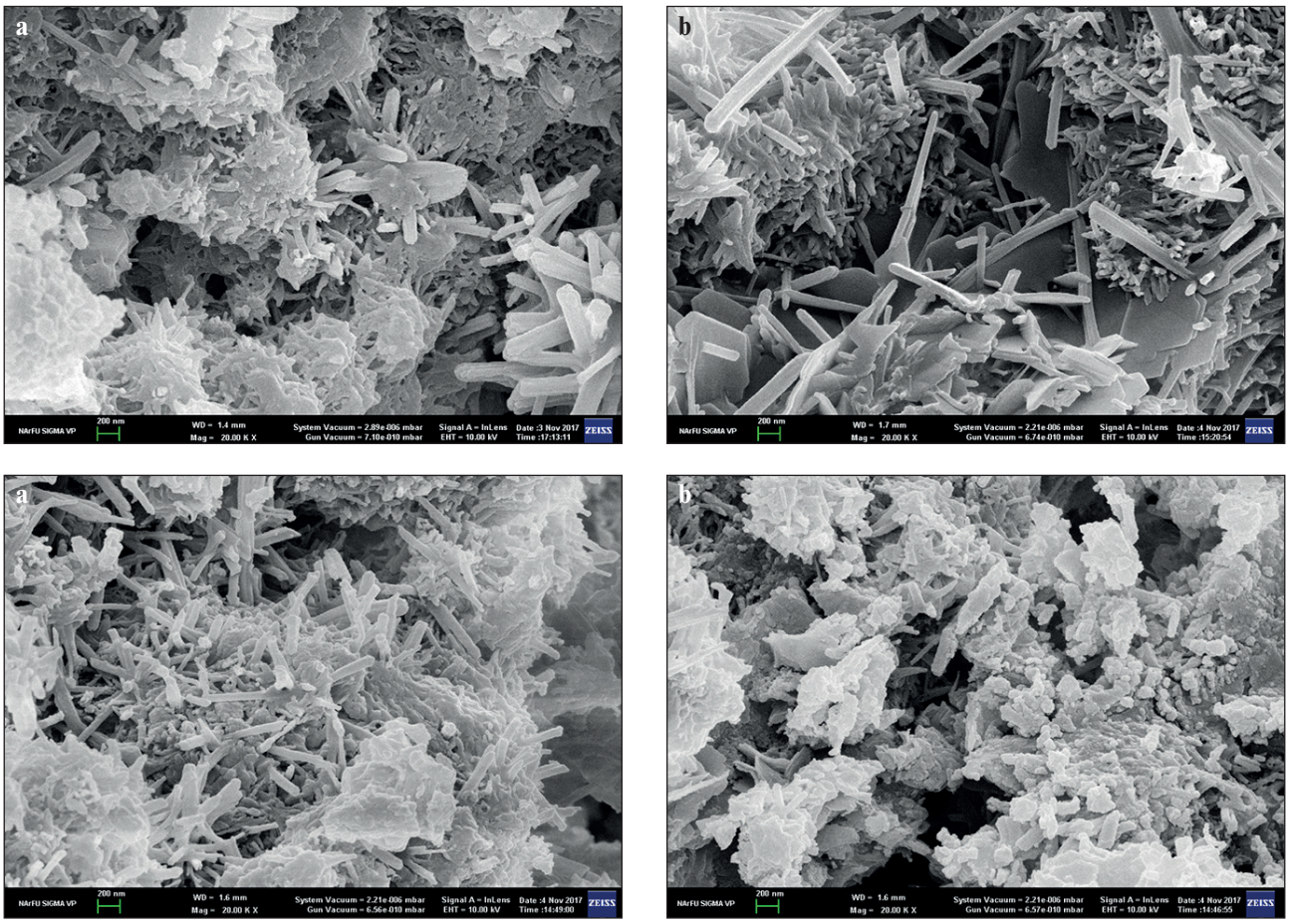

Fig. 3. **Microstructure of fine-grained concrete samples during hardening:**
a) under normal conditions; b) accelerated method (steaming)

Table 3
The change in the amount of swelling of saponite-containing material from time to time

Exposure time, min	The volume of the SCM suspension, cm³		Change in the volume of the SCM, cm³
	dry	water-saturated	
30	2.2	7.9	5.7
90	2.4	9.6	7.2
180	2.0	11.0	9.0

lowing provision: in the case of using a highly dispersed saponite-containing material additive to produce fine-grained concrete, it is impossible to change the conditions of curing of samples from normal to accelerated method by steaming them. In the latter case, already after exposure of experimental samples at temperature and humidity for two or three hours there is a loss of their strength properties. This fact is associated with the processes of saturation of saponite particles with water and their subsequent significant swelling.

REFERENCES

1. Mazilova E.A. Development of Arctic tourism on the example of the Solovetsky archipelago. *In the collection: Russian North and the Arctic: fundamental problems of history and modernity. Collection of scientific articles*. Compiled by O.V. Zaretskaya. Arkhangelsk. 2019; 55-61.

2. Grushenko E.B. Development of tourism industry on the Solovetsky Islands. *Nauka-2020*. 2016; 5(11).

3. Tsvetkov A.Yu. Strategy of recreational and infrastructural development of the Solovetsky Islands. *Economics and Entrepreneurship*. 2018; 2(91): 282-286.

4. Zinevich S.I., Kayumov A.K. Slabs for prefabricated road pavements with the least "key" effect. *Science and Technology*. 2022; 21(3): 196-200.

5. Trofimov V.I., Egorov A.R., Khitrich G.A. Prefabricated Road Slabs for Arctic Zones. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022; 12: 51-56.

6. Sharifov A., Akramov A.A., Umarov U.Kh., Khokiyev M.K., Akhmedov M.F. Effects of microfilling mineral additives in concrete. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. 2020; 1(49): 150-154.

7. Poorna P.S., Mohamed I.A., Lakshmi P.S., Gayathri G., Beulah M., Sudhir M.R. A comprehensive investigation of the effect of mineral additives to bituminous concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46(1): 714-721. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.090

8. Zhen H., Lingling H., Yang L., Jun H., Yixin S. Use of sandstone powder as a mineral additive for concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 186: 276-286. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.228

9. Xianfeng W., Shaocong C., Zhenhong Y., Jun R., Xiaogang Z., Feng X. Self-healing concrete incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: Preparation and application. *Construction and Building Materials*, 2021; 301: 124119. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124119

10. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtsev A.S., Ayzenshtadt A.M. Investigation of kinetics of structure formation of cement disperse systems. Part I. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 176-189. https:// doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189

11. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtsev A.S., Ayzenshtadt A.M. Investigation of kinetics of structure formation of cement disperse systems. Part II. *Nanotechnologies in construction*. 2022; 14(4): 263-273. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273

12. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. Efficiency of complex mineral additive in fine-grained self-compacting concrete. *Regional architecture and construction*. 2021; 3(48): 114-122.

13. Pichugin A.P., Chesnokov R.A., Tamarova V.S., Pivkina A.D. Strengthening of road soil bases by mineral binders with disperse additives. *Far East: problems of development of architectural and construction complex*. 2021; 1: 178-183.

14. Gaowen Z., Zhen Z., Guanzhou R., Tao W., Peng J., Shijun D., Mei S., Henghui F. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties. *Construction and Building Materials*. 2023; 389: 131626. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626

15. Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Application of saponite-containing material for obtaining frost-resistant concrete. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 1: 28-31.

16. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development // The Open Ecology Journal. 2014; 7: 32-36.

17. Glaser A.M. Amorphous and nanocrystalline structures: similarity, differences, mutual transitions. *Russian Chemical Journal*. 2002; 46(5): 57-63.

18. Prsembaev M.K., Kovalev Y.N., Yaglov V.N. Features of the processes of hydration and hardening of cement in the presence of nanoparticles. *Bulletin of East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbaev*. 2020; 1: 175-184.

19. Morozova M.V. Sorption of water phase by mineral saponite-containing additive in fine-grained concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 4: 20-25.

20. Mingxu C., Lingchao L., Shoude W., Piqi Z., Wenlong Z., Shuxin Z. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. *Construction and Building Materials*. 2017; 280-288.

21. Oh J.E., Clark S.M., Wenk H.R. Experimental determination of bulk modulus of 14 Å tobermorite using high pressure synchrotron X-ray diffraction. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(2): 397-403.

22. Tikkanen J., Cwirzen A., Penttala V. Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 72: 7-14.

23. Meducin F., Zanni H., Noik C. Tricalcium silicate (C_3S) hydration under high pressure at ambient and high temperature. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(3): 320-324.

24. Kaftaeva M.V., Rakhimbaev I.Sh. To the question of phase composition of hydrosilicate binder of autoclaved aerated concrete. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013; 10(3): 370-372.

25. Galitskov K.S., Baranova M.N., Bolkhovetsky A.S. Investigation of the influence of the structural-phase composition of the aerated concrete on the internal heat generation in the process of its autoclave treatment. *Town-planning and architecture*. 2023; 13(51): 73-78.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina V. Morozova – Cand. Sci (Eng.), associate professor, Composite materials and construction ecology department, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia, m.morozova@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8497-9786

The author declares no conflicts of interests.

The article was submitted 18.05.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 10.06.2024.

Научная статья
УДК 691.223.7
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234

CC BY 4.0

Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала

Марина Владимировна Морозова
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия
e-mail: m.morozova@narfu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для восстановления и развития дорожной сети Соловецких островов могут быть использованы бетонные плиты. В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных плит активно внедряются составы с добавками отходов производств, в том числе микро- и наноуровня. Для Архангельской области в качестве такого материала может применятся сапонитсодержащий отход горнодобывающей промышленности. При этом одним из способов ускорения процесса набора прочности композитов является пропаривание. Однако исследования, связанные с влиянием температурно-влажностной обработки на процесс твердения композита с высокодисперсным сапонитсодержащим материалом (ССМ), ранее не был изучен. Известно, что процесс сорбции влаги высокодисперсной добавкой позволяет управлять структурообразованием при твердении бетона, улучшая его эксплуатационные характеристики. Однако в условиях повышенной влажности количественное содержание воды затворения, рассчитанное исходя из величины водопоглощения ССМ, может значительно измениться и оказать влияние на процесс набора прочности композита. Поэтому **целью данной работы** является изучение влияния температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой ССМ. Установлено, что ускоренный метод твердения бетона оказывает только положительный эффект на формирование прочной и плотной структуры. Однако в случае использования в качестве добавки высокодисперсного сапонитсодержащего материала может наблюдаться и обратный эффект (снижение прочности), связанный с сорбционными свойствами и особенностями его структуры. **Методы и материалы.** Выделенный из оборотной воды ССМ высушивали до постоянной массы и диспергировали на планетарной шаровой мельнице. Размер частиц определяли методом измерения динамического и электрофоретического светорассеяния, а величину удельной поверхности – методом сорбции азота (теория БЭТ). Набор прочности образцов мелкозернистого бетона контрольного и опытного (с добавкой ССМ) составов осуществляли двумя способами: в нормальных условиях и ускоренным методом с помощью пропаривания. Испытания на прочность образцов-кубов размером 70×70×70 мм проводили на автоматическом испытательном прессе по ГОСТ 10180. Исследование микроструктуры образцов осуществляли методом растровой электронной микроскопии. **Результаты и обсуждение.** Выделенный, высушенный и измельченный сапонитсодержащий материал (в виде порошка) обладал средним размером частиц 445±40 нм и удельной поверхностью 50670±10 м^2/кг. В продолжение исследований были изготовлены контрольные (МЗБ) и опытные образцы мелкозернистого бетона (МЗБссм). Количество высокодисперсной добавки вводили в бетонную смесь на основе ранее полученных результатов кинетических исследований процесса водопоглощения сапонитсодержащего материала. Определение прочностных характеристик 1-МЗБ и 1-МЗБ$_{ссм}$, твердеющих в нормальных условиях, проводили на 28 сутки. Образцы 2-МЗБ и 2-МЗБ$_{ссм}$ спустя сутки после затворения водой помещали в пропарочную камеру. По истечении времени выдержки их постепенно охлаждали и определяли прочностные характеристики. Установлено, что ускоренный способ набора прочности мелкозернистого бетона путем пропаривания положительно действует только на контрольные образцы. Для композита с добавкой ССМ температурно-влажностная обработка оказывает противоположное действие. Так, динамика набора прочности 1-МЗБ и 1-МЗБ$_{ссм}$ имеет однотипный характер. В начальный момент времени наблюдается активный участок набора прочности, но на 7 сутки прочность при сжатии у образцов опытного состава на 40% выше, чем у контрольного. При ускоренном способе твердения в первые два часа (стадия изотермического прогрева) наблюдался активный участок повышения прочности у 2-МЗБ и 2-МЗБ$_{ссм}$. Последующее твердение контрольных образцов имеет линейную зависимость с постепенным повышением прочности до проектной за шесть часов. Для 2-МЗБ$_{ссм}$ спустя два часа пропаривания прочность резко начинает снижаться, а спустя шесть часов – наступает видимое разрушение структуры бетона. Следовательно, продолжительное температурно-влажностное воздействие на бетон с высокодисперсной добавкой ССМ приводит к снижению прочностных характеристик образцов. Вероятнее всего, это связано с перенасыщением влагой структуры композита. Поэтому в продолжение исследований были сделаны электронные фотографии микроструктуры

© Морозова М.В., 2024

бетона после трехчасового выдерживания в пропарочной камере. Так, микроструктура 2-МЗБ$_{ССМ}$, в основном, представлена губчатыми частицами, а количество образовавшихся игольчатых (кристаллов тоберморита) значительно уменьшилось по сравнению с контрольным. Наблюдается также значительное образование в опытном образце пустот, которые можно отнести к дефектам структуры полученного композита. Кроме того, сапонит имеет трехслойную кристаллическую структуру, а расстояние между ее пакетами может легко изменяться, так как связь между ними обуславливают только силы Ван-дер-Ваальса. Это может приводить к значительному набуханию ССМ под действием влаги и создавать избыточное давление в микроструктуре твердеющего мелкозернистого бетона, вызывая разрушение внутренней структуры с последующим снижением прочностных характеристик. Поэтому в продолжение исследований был выполнен следующий эксперимент: навеску сапонитсодержащего материала помещали в стеклянный мерный цилиндр и добавляли в него воды. Полученные данные по набуханию показали, что все пробы высокодисперсного сапонитсодержащего материала активно поглощали воду. Так, через 30 минут материал увеличился в объеме в 3,6 раза, а спустя три часа – в 5,5 раза, по сравнению с первоначальным. **Заключение.** Важный практический вывод представленных экспериментальных результатов являет следующее положение: в случае использования высокодисперсной добавки сапонитсодержащего материала для получения мелкозернистого бетона, нельзя менять условия твердения образцов с нормальных на ускоренный способ путем их пропаривания. В последнем случае после выдержки опытных проб при температурно-влажностном воздействии в течение двух-трех часов происходит потеря их прочностных качеств. Данный факт связан с процессами насыщения частиц сапонита водой и последующим их значительным набуханием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сапонитсодержащий материал, пропаривание, температурно-влажностная обработка, мелкозернистый бетон, высокодисперсная добавка, набухание, прочность на сжатие.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Морозова М.В. Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 227–234. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234. – EDN: DXLKDK.

ВВЕДЕНИЕ

Соловецкие острова являются наиболее популярным и востребованным историко-культурным комплексом Архангельской области [1, 2]. С целью сохранения и развития культурного и природного наследия архипелага Правительством Российской Федерации распоряжением №163-р от 05.02.2016 г. был утвержден план мероприятий, который реализуется при поддержке Минстроя России и включает модернизацию инженерной, жилищно-коммунальной и социальной инфраструктуры острова.

Важной составляющей для выполнения данного плана является развитие и восстановление дорожной сети архипелага, связанное с реконструкцией и восстановлением имеющихся объектов, строительством новых постоянных и временных транспортных магистралей [3]. Так, например, для восстановления и развития дорожной сети Соловецких островов могут быть использованы бетонные плиты. Эти сборные, устраиваемые из отдельных изделий дорожные покрытия изготавливаются на заводах с соблюдением технологических правил и режимов ухода за бетоном, обеспечивающих их необходимое качество. Преимуществом дорожных железобетонных плит является возможность движения транспорта сразу после устройства покрытия [4, 5].

В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик бетонных изделий активно внедряются составы с добавками отходов производств [6–8], в том числе микро- и наноуровня [9–14].

Важная экономическая составляющая такого подхода связана с использованием местной (локально распространенной) сырьевой базы. Так, для Архангельской области в качестве такого материала может применятся сапонитсодержащий отход горнодобывающей промышленности. Эффективность его использования в композициях с цементом была доказана рядом исследований. Так, в [15, 16] установлено, что при получении мелкозернистого бетона добавка высокодисперсного сапонитсодержащего материала (ССМ) снижает расход вяжущего за счет химической трансформации соединений, входящих в состав минералов горной породы [17, 18], и повышает эксплуатационные характеристики, такие как прочность, морозостойкость и водонепроницаемость. Поэтому возможность применения мелкозернистых бетонов с добавкой ССМ для производства дорожных плит приобретает особое значение как с экономической (снижение расхода цемента), так и с экологической (утилизация отходов производств) точек зрения.

Одним из способов ускорения процесса набора прочности композитов является пропаривание.

Это позволяет значительно сократить сроки изготовления бетонных изделий, не снижая их качество, и увеличить объем продукции. Однако исследования, связанные с влиянием температурно-влажностной обработки на процесс твердения композита с добавкой сапонитсодержащего материала, ранее не были изучены. Вместе с тем установлено [19], что сорбция влаги высокодисперсным ССМ, управляющей структурообразованием при твердении бетона, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики композита. Кроме того, при проектировании состава изделия количественное содержание воды затворения рассчитывается исходя из величины водопоглощения сапонитсодержащего материала, при котором достигалась оптимизация содержания водной фазы в системе. Однако в условиях повышенной влажности данное соотношение может значительно измениться и оказать влияние на процесс набора прочности композита.

Поэтому **целью данной работы** является изучение влияния температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала.

В исследованиях [20] показано, что в нормальных условиях твердения образование трехкальциевого силиката (C_3S) приводит к формированию слабокристаллических гидратов силиката кальция (C–S–H) с последующим образованием портландита [21, 22]. Повышение температуры окружающей среды приводит к тому, что связи в C–S–H становятся неустойчивыми [23], а при 70°C – образуются кристаллы C_2SH, ускоренное формирование которых приводит к снижению механических свойств композита. Данное негативное действие можно компенсировать за счет уменьшения Ca/Si отношения, что достигается путем увеличения микродисперсной составляющей в бетонной смеси.

Кроме кристаллов гидросиликатов кальция, которые являются основными носителями прочности, в бетоне также формируются волокнистые тоберморитоподобные соединения. В настоящее время существует множество работ, посвященных искусственному синтезированию кристаллов тоберморита [20, 24]. Поэтому влияние высоких температур на процессы его образования достаточно хорошо изучено. Установлено, что формирование кристаллов происходит при 160 – 180°C, а нагревание до 300°C превращает тоберморит в риверсайдит. В случае продолжительной обработки насыщенным паром (в первые сутки твердения бетона) тоберморит при температуре 150°C замещается ксонотлитом [25]. Следовательно, ускоренный метод твердения бетона должен оказывать только положительный эффект на формирование прочной и плотной структуры. Однако в случае использования в качестве добавки высокодисперсного сапонитсодержащего материала может наблюдаться и обратный эффект (снижение прочности), связанный с сорбционными свойствами и особенностями его структуры.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Материалы

Для проведения исследований опытные пробы сапонитсодержащей суспензии отбирались из хвостохранилища на глубине 1 метр. Затем выделяли ССМ из оборотной воды методом электролитной коагуляции, основанной на переводе высокодисперсных частиц твердой фазы в состояние, близкое к изоэлектрическому.

Для изготовления образцов мелкозернистого бетона в качестве вяжущего был использован портландцемент ЦЕМ II/А-Ш 32,5Н производителя «Евроцемент». Заполнитель – песок средней крупности месторождения «Кеницы», Архангельская область. Вода затворения – водопроводная, соответствующая ГОСТ 23732-2011.

Методы

Выделенный из оборотной воды сапонитсодержащий материал высушивали в сушильном шкафу фирмы «BINDER» до постоянной массы при температуре 105°C. Для получения высокодисперсной твердой фазы использовали метод механического диспергирования и планетарную шаровую мельницу «Retsch PM100». Измельчение материала осуществлялось в течение 90 мин при скорости вращения ротора 420 об/мин с использованием мелющих тел в количестве 20 шт., выполненных из карбидвольфрама (шары диаметром 20 мм).

Размер частиц определяли на анализаторе размера субмикронных частиц и дзета-потенциала Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers («DelsaNano») методом измерения динамического и электрофоретического светорассеяния. Полученный высокодисперсный образец охарактеризовали методом сорбции азота на анализаторе «Autosorb-iQ-MP» по величине удельной поверхности $S_{уд}$ (теория БЭТ).

Модуль крупности и истинную плотность песка определяли по ГОСТ 8735-88, а истинную плотность сапонитсодержащего материала – по ГОСТ 21216-2014. Химический состав ССМ определяли на рентгенофлуоресцентном анализаторе «МетЭксперт».

Изготовление образцов мелкозернистого бетона контрольного и опытного (с добавкой ССМ) составов осуществляли по стандартным методикам. Набор прочности образцов определяли двумя способами:

в нормальных условиях (использовали камеру-шкаф «КНТ-60» для хранения образцов бетона и цемента с автоматическим поддержанием температуры и влажности) и ускоренным методом с помощью пропаривания (камера пропарочная универсальная «КУП-1» по ГОСТ 9758-86 и ГОСТ 25485-89).

Испытания на прочность образцов-кубов размером 70×70×70 мм проводили на автоматическом испытательном прессе «ТП-1000» (прочность на сжатие по ГОСТ 10180). Предел прочности при сжатии определяли как среднее арифметическое по трем параллельным измерениям.

Для исследования микроструктуры образцов мелкозернистого бетона методом растровой электронной микроскопии использовали электронный микроскоп «Zeiss Sigma VP» (ЦКП «Арктика» при САФУ имени М.В. Ломоносова).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выделенный, высушенный и измельченный сапонитсодержащий материал (в виде порошка) обладал средним размером частиц 445±40 нм и удельной поверхностью 50670±10 м^2/кг.

Истинные плотности песка (модуль крупности $M_к$ = 2,21) и ССМ составили 2640 кг/м^3 и 2630 кг/м^3, соответственно.

Определенный элементный состав (табл. 1) сапонитсодержащего материала, и в пересчете на оксиды, показал, что основными составляющими анализируемой пробы являются оксиды кремния, магния и железа.

Из представленных данных следует, что сапонитсодержащий материал не содержит вредных для здоровья человека элементов, концентрация которых превышает предельно-допустимые значения.

В продолжение исследований были изготовлены контрольные (МЗБ) и опытные (с добавкой ССМ) образцы мелкозернистого бетона (МЗБ$_{ссм}$), составы которых представлены в табл. 2. Количество высокодисперсной добавки, которое вводили в бетонную смесь, рассчитывали на основании ранее полученных результатов кинетических исследований процесса водопоглощения сапонитсодержащего материала [19]. Равномерность смешения высокодисперсной минеральной добавки с исходными сырьевыми компонентами достигали последовательным перемешиванием вяжущего и заполнителя с добавкой ССМ.

Как уже отмечалось выше, набор прочности образцов осуществляли двумя способами: в нормальных условиях (1-МЗБ; 1-МЗБ$_{ссм}$) и ускоренным путем пропаривания (2-МЗБ; 2-МЗБ$_{ссм}$) при температуре 80°С в течение шести часов. Определение прочностных характеристик 1-МЗБ и 1-МЗБ$_{ссм}$ проводили на 28 сутки (проектный возраст). Образцы 2-МЗБ и 2-МЗБ$_{ссм}$ спустя сутки после затворения водой извлекали из металлических форм и помещали в пропарочную камеру. По истечении времени выдержки образцы постепенно охлаждали, обтирали сухой тряпкой с целью удаления лишней влаги и определяли их прочностные характеристики.

Динамика набора прочности мелкозернистого бетона опытного и контрольного составов приведена на рис. 1.

Таким образом, ускоренный способ набора прочности мелкозернистого бетона путем пропаривания положительно действует только на контрольные образцы. Для композита с добавкой ССМ температурно-влажностная обработка оказывает противоположное действие.

Полученные результаты (рис. 1) показали, что динамика набора прочности образцов, твердеющих

Таблица 1
Элементный состав ССМ и в пересчете на оксиды

Элемент	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Sr
Содержание, %	22,00	4,82	46,89	2,21	5,45	1,19	0,23	0,35	16,30	0,39	0,17
Оксид	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**TiO_2**	**CrO**	**MnO_2**	**Fe_2O_3**	**NiO**	**SrO**
Содержание, %	19,80	4,94	54,43	1,44	4,14	1,08	0,36	0,77	12,65	0,27	0,11

Таблица 2
Состав образцов мелкозернистого бетона

Образец	Состав на получение 1 м^3 бетонной смеси, кг				Плотность, кг/м^3
	цемент	песок	вода	ССМ	
Контрольный, МЗБ	557	1380	283	–	2107
Опытный, МЗБ$_{ссм}$	557	1358	390	22	2292

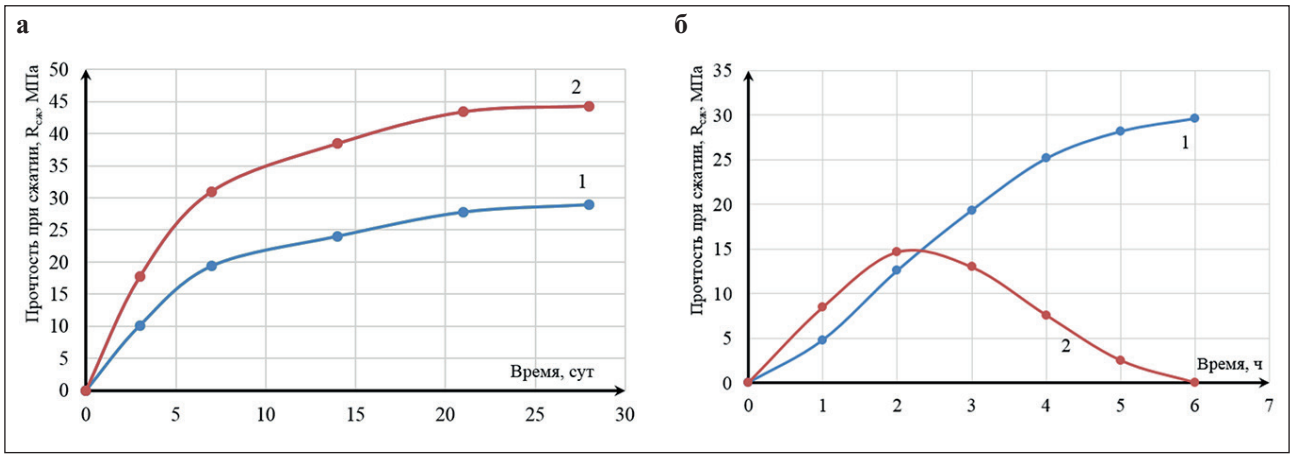

Рис. 1. **Динамика набора прочности образцов мелкозернистого бетона при твердении:** а) в нормальных условиях; б) ускоренным способом (пропаривание); 1 – контрольный состав; 2 – опытный состав

в нормальных условиях, имеет однотипный характер как для опытного, так и для контрольного составов. В начальный момент времени (7 сут.) наблюдается активный участок набора прочности. Однако уже на 7 сутки прочность при сжатии у образцов опытного состава на 40% выше, чем у контрольного. Проектная прочность (на 28 сутки) для 1-МЗБ составила 28,94 МПа (класс В20), а для 1-МЗБ$_{ссм}$ – 44,28 МПа (класс В30). Стоит отметить, что введение высокодисперсной сапонитсодержащей добавки способствует повышению класса прочности бетона и ведет к сокращению цементной составляющей.

При ускоренном способе твердения динамика набора прочности 2-МЗБ$_{ссм}$ имеет отличный характер. Так, в первые два часа (стадия изотермического прогрева) наблюдается активный участок повышения прочности у обоих образцов. Причем для опытного этот участок характеризуется большей интенсивностью. Последующее твердение 2-МЗБ имеет линейную зависимость с постепенным повышением прочности до проектной за шесть часов. Для 2-МЗБ$_{ссм}$ спустя два часа пропаривания прочность резко начинает снижаться, а спустя шесть часов наступает видимое разрушение структуры бетона (рис. 2).

Исследования показали, что стадия изотермического нагрева положительно влияет на набор прочности образцов 2-МЗБ$_{ссм}$ только в начальный период (в течение двух часов). Продолжительное пропаривание этого бетона приводит к снижению прочностных характеристик опытных образцов, что, вероятнее всего, связано с перенасыщением влагой структуры композита.

С целью объяснения резкого снижения прочности бетона с высокодисперсной сапонитсодержащей добавкой были сделаны фотографии микроструктуры образцов после трехчасового выдерживания в пропарочной камере «КУП-1» (рис. 3).

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) композитов, набравших проектную прочность через 28 суток, показала, что структура опытного и контрольного образцов представлена в виде конгломератов частиц и новообразований гидросиликатов, размер которых колеблется от 2 до 20 мкм. В обоих материалах присутствуют губчатые, с развитой микропористой поверхностью и игольчатые части-

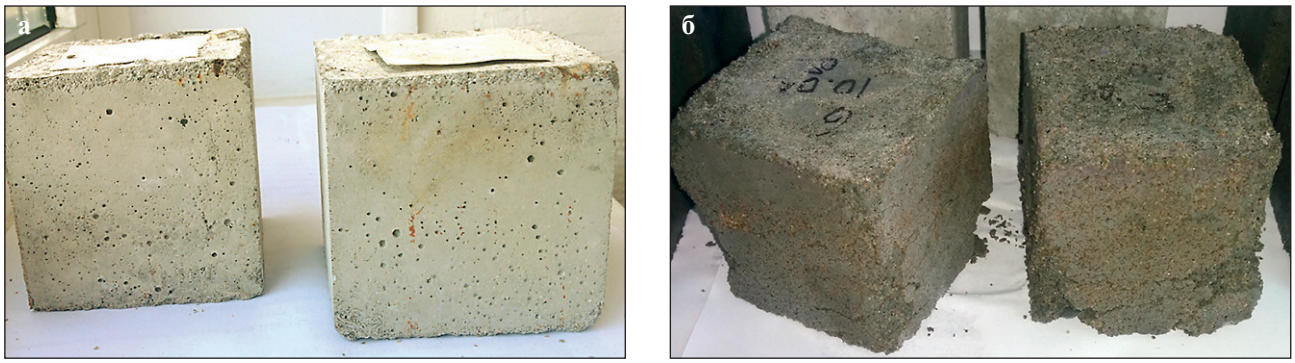

Рис. 2. **Внешний вид образцов после пропаривания состава:** а) контрольного; б) опытного

Контрольный состав **Опытный состав**

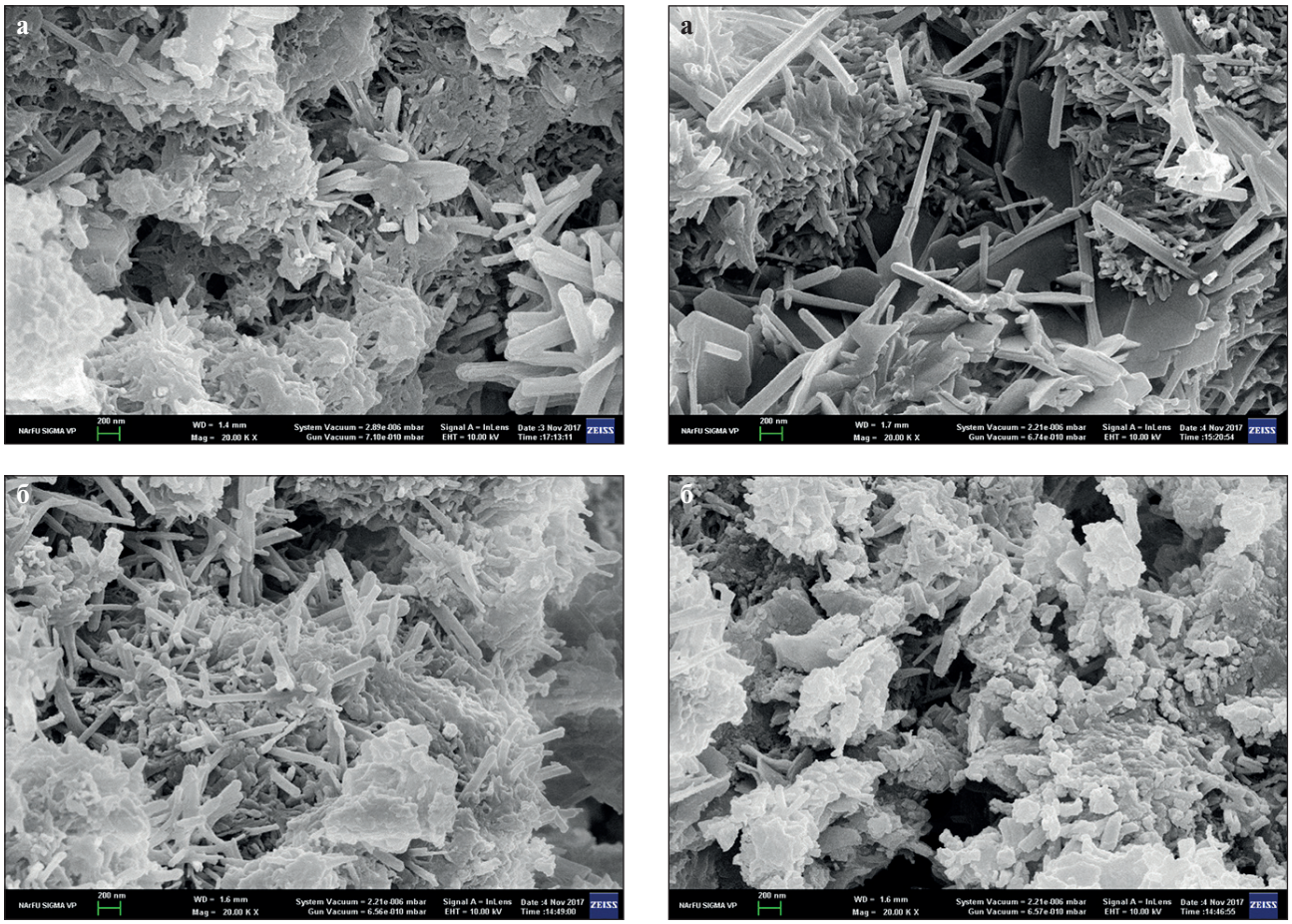

Рис. 3. **Микроструктура образцов мелкозернистого бетона при твердении:**
а) в нормальных условиях; б) ускоренным способом (пропаривание)

цы. Причем количество и длина последних в структуре опытного образца возрастает почти в 2 раза по сравнению с контрольным. Дополнительное образованием кристаллов игольчатой формы свидетельствует о присутствии субмикрокристаллов гидросиликатов группы тоберморита, которые образуются в присутствии высокодисперсной сапонитсодержащей добавки и играют роль дополнительного связующего.

После температурно-влажностной обработки мелкозернистого бетона с высокодисперсной добавкой его микроструктура была представлена, в основном, губчатыми частицами, а количество образовавшихся игольчатых значительно уменьшилось по сравнению с контрольным. Наблюдается также значительное образование в опытном образце пустот, которые можно отнести к дефектам структуры полученного бетона.

Известно, что сапонит имеет трехслойную кристаллическую структуру, причем расстояние между ее пакетами может легко изменяться, так как связь между ними обуславливают только силы Ван-дер-Ваальса. Данный факт может приводить к значительному набуханию высокодисперсных глинистых порошков под действием влаги (воды).

Такое набухание частиц тонкодисперсной минеральной добавки создает избыточное давление в микроструктуре твердеющего композита. Этот процесс вызывает разрушение внутренней структуры мелкозернистого бетона с ССМ и приводит к снижению его прочностных характеристик при пропаривании.

В продолжении исследований для подтверждения выше высказанной гипотезы был выполнен следующий эксперимент: навеску сапонитсодержащего материала массой 2 г помещали в стеклянный мерный цилиндр объемом 50 см^3 и добавляли в него 20 мл воды. Полученную реакционную смесь интенсивно перемешивали путем встряхивания и отстаивали в течение 30, 90, 180 мин (табл. 3).

Полученные данные (табл. 3) показали, что все пробы высокодисперсного сапонитсодержащего ма-

Таблица 3
Изменение величины набухания сапонитсодержащего материала от времени

Время выдержки, мин	Объем навески ССМ, см^3		Изменение объема ССМ, см^3
	сухого	водонасыщенного	
30	2,2	7,9	5,7
90	2,4	9,6	7,2
180	2,0	11,0	9,0

териала активно поглощали воду. Так, через 30 минут материал увеличился в объеме в 3,6 раза, а спустя три часа – в 5,5 раза, по сравнению с первоначальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важный практический вывод, который можно сделать на основании представленных экспериментальных результатов, являет следующее положение: в случае использования высокодисперсной добавки сапонитсодержащего материала для получения мелкозернистого бетона нельзя менять условия твердения образцов с нормальных на ускоренный способ путем их пропаривания. В последнем случае уже после выдержки опытных проб при температурно-влажностном воздействии в течение двух-трех часов происходит потеря их прочностных качеств. Данный факт связан с процессами насыщения частиц сапонита водой и последующим их значительным набуханием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мазилова Е.А. Развитие арктического туризма на примере Соловецкого архипелага // В сборнике: Русский Север и Арктика: фундаментальные проблемы истории и современности. Сборник научных статей. Составитель О.В. Зарецкая. Архангельск. 2019. 55-61

2. Грушенко Э.Б. Развитие индустрии туризма на Соловецких островах // Наука-2020. 2016. № 5 (11)

3. Цветков А.Ю. Стратегия рекреационно-инфраструктурного развития Соловецких островов // Экономика и предпринимательство. 2018. № 2 (91). 282-286

4. Зиневич С.И., Каюмов А.К. Плиты для сборных дорожных покрытий с наименьшим «клавишным» эффектом // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 3. 196-200

5. Трофимов В.И., Егоров А.Р., Хитрич Г.А. Сборные дорожные плиты для арктических зон // Научный вестник Арктики. 2022. № 12. 51-56

6. Шарифов А., Акрамов А.А., Умаров У.Х., Хокиев М.К., Ахмедов М.Ф. Эффекты микронаполняющих минеральных добавок в бетоне // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 1 (49). 150-154

7. Poorna P.S., Mohamed I.A., Lakshmi P.S., Gayathri G., Beulah M., Sudhir M.R. A comprehensive investigation of the effect of mineral additives to bituminous concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46(1): 714-721. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.090

8. Zhen H., Lingling H., Yang L., Jun H., Yixin S. Use of sandstone powder as a mineral additive for concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 186: 276-286. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.228

9. Xianfeng W., Shaocong C., Zhenhong Y., Jun R., Xiaogang Z., Feng X. Self-healing concrete incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: Preparation and application. *Construction and Building Materials*, 2021; 301: 124119. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124119

10. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 3. 176–189. https:// doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189

11. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А. М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 4. 263–273. https://doi. org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273

12. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. Эффективность комплексной минеральной добавки в мелкозернистом самоуплотняющемся бетоне // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). 114-122

13. Пичугин А.П., Чесноков Р.А., Тамарова В.С., Пивкина А.Д. Укрепление дорожных грунтовых оснований минеральными вяжущими с дисперсными добавками // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2021. № 1. 178-183.

14. Gaowen Z., Zhen Z., Guanzhou R., Tao W., Peng J., Shijun D., Mei S., Henghui F. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties. *Construction and Building Materials*. 2023; 389: 131626. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626

15. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Применение сапонит-содержащего материала для получения морозостойких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. 28-31.

16. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development // The Open Ecology Journal. 2014; 7: 32-36.

17. Глезер А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходство, различия, взаимные переходы // Российский химический журнал. 2002. Т.46. № 5. 57—63

18. Пшембаев М.К., Ковалев Я.Н., Яглов В.Н. Особенности процессов гидратации и твердения цемента в присутствии наночастиц // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2020. № 1. 175-184

19. Морозова М.В. Сорбция водной фазы минеральной сапонит-содержащей добавкой в мелкозернистые бетоны // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. 20-25

20. Mingxu C., Lingchao L., Shoude W., Piqi Z., Wenlong Z., Shuxin Z. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. *Construction and Building Materials*. 2017; 280-288.

21. Oh J.E., Clark S.M., Wenk H.R. Experimental determination of bulk modulus of 14 Å tobermorite using high pressure synchrotron X-ray diffraction. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(2): 397-403.

22. Tikkanen J., Cwirzen A., Penttala V. Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 72: 7-14.

23. Meducin F., Zanni H., Noik C. Tricalcium silicate (C_3S) hydration under high pressure at ambient and high temperature. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(3): 320-324.

24. Кафтаева М.В., Рахимбаев И.Ш. К вопросу о фазовом составе гидросиликатного связующего автоклавного газобетона // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10 (3). 370-372

25. Галицков К.С., Баранова М.Н., Болховецкий А.С. Исследование влияния структурно-фазового состава ячеистого бетона на внутреннее тепловыделение в процессе его автоклавной обработки // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 51. 73-78

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Морозова Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, m.morozova@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8497-9786

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242

CC BY 4.0

Study of thermal effect based on liquid crystal nanoparticles

Rezida G. Rakhmatullina[1], Nestor Njiya[2], Alexei A. Rusinov[3], Albina R. Maskova[3]*

[1] Kazan State Agrarian University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
[2] Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
[3] Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

* Corresponding author: e-mail: asunasf@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, the development of composite systems doped with nanoparticles and based on liquid crystal (LC) media is being actively pursued. The latter, having unique properties, can be used to improve various LC devices. For this purpose, it is very important to investigate the mechanism of change in the properties of liquid crystal systems from the size and concentration of nanoparticles. Recently, a sufficient number of methods have been applied to measure the flow of liquid or gas based on different physical principles. Information about the average mass flow rate of a liquid or gas can be obtained by a measurement method based on steady-state heat injection into the flow. The average flow velocity can be measured by electromagnetic and ultrasonic sensors, while the average volume flow rate can be measured by hydrodynamic (aerodynamic) as well as mechanical turbine methods. In heat transfer and mass transfer, convective motion in a fluid medium plays an important role in the vast majority of natural phenomena and technological processes. Many processes of convective mass transfer and heat transfer in chemical, petrochemical, construction, nuclear and other industries are carried out in heat pipes. Up to the present time the question about efficiency of heat pipes application with bodies from composite materials also remains open. In the presented work the following objectives were set: to assemble an experimental setup to study the thermal effect (flow), to conduct studies of temperature change on the surface of the conductor of the compound based on nanoparticles of liquid crystals and viscosity of liquid crystals from the concentration of nanoparticles. **Methods and Materials.** In this experimental work, a heat flux acts in the region of the outer boundary of the conductor. Note that the redistribution of the thermal field is influenced by such processes as heat conduction and heat transfer. To observe the thermal effect, compounds based on liquid crystal nanoparticles were used. Nanostructured liquid crystal systems have a unique property as fluidity inherent in ordinary liquids. For opaque conductor walls, a method for determining the direction of heat flow is proposed. Earlier experimental studies have shown that temperature measurement is possible only by pyrometric method. Therefore, the redistribution of temperature change on the conductor flow surface was recorded using an optical pyrometer that perceives thermal (infrared) radiation. In this work, a compound based on liquid crystal nanoparticles, namely with the addition of cholesteryloleate, was used as a base. **Results and discussion.** In the course of the study, temperature dependences in the heat flow zone of the conductor in the absence and in the presence of liquid motion were experimentally obtained. Dependences of temperature change on the surface of the conductor with compounds based on nanoparticles of liquid crystals have been measured. Inhomogeneous redistribution of the thermal field is shown. The results of the study of the dependence of the viscosity of nematic liquid crystals on the concentration of nanoparticles are presented. **Conclusion.** The above data show that the thermal effect on the surface is not uniformly distributed. For visualization of the thermal effect, compounds based on nanoparticles of liquid crystals turned out to be more effective. A technique has been developed to determine the direction and calculate mathematically the magnitude of the liquid heat flux in the opaque conductor flow. It should be noted that the viscosity of liquid crystals changes when nanoparticles are coupled.

KEYWORDS: viscosity, fluid motion, liquid crystals, concentration, nanostructured systems, nanoparticles, conductor, temperature, temperature inhomogeneity, thermal effect.

FOR CITATION:
Rakhmatullina R.G., Njiya N., Rusinov A.A., Maskova A.R. Study of thermal effect based on liquid crystal nanoparticles. *Nanotechnologies in Construction.* 2024; 16(3): 235–242. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242. – EDN: HCIGHR.

© Rakhmatullina R.G., Njiya N., Rusinov A.A., Maskova A.R., 2024

INTRODUCTION

Nanostructured and highly dispersed systems and have chemical, electrical, magnetic, mechanical, optical and other properties. The formation of nanostructured systems can lead to changes in physical properties, namely: change the strength, yield strength, heat capacity, temperature, magnetic transitions, etc. Therefore, having unique properties, can widely attract the attention of specialists in physics, chemistry, materials science, biology [1–3].

It is now known that the flow of liquids and gases through water, oil and gas pipes is encountered in many different areas of industry. The physical and chemical laws of flow of liquids and gases play an important role in the separation process.

In opaque conductors, the task of determining the direction, measuring the magnitude of the fluid flow and the flow rate of the fluid volume in the conductors arises. There are several ways to determine the thermal effect and temperature [4–8]. In this work, the thermal effect was measured by pyrometric method.

Consider two bodies, bring them into contact and heat them.

We know that the temperature will change in time. The contact of the bodies leads to an increase in the motion of the smallest particles, and accordingly there will be an exchange of energy between the smallest particles. The exchange of energy transferred between tiny particles from a hotter body to a colder one is called heat effect (flux). Thus, heat spreads from a point of higher temperature to a point of lower temperature in all directions. For the thermal effect to occur in different surfaces of space, it is enough to create different temperatures in these surfaces with the presence of a temperature difference [9–13].

Heat pipes are the most important elements of thermal power plants, which are self-contained, hermetically sealed, two-phase heat transfer devices. Let us enumerate their advantages: simplicity of construction; ability to withstand large heat flows at insignificant temperature differences; small mass; heat pipe can operate in a wide temperature range; in addition, the thermal conductive properties of heat pipes are higher than those of the most thermally conductive metals [14–19].

The principle of operation of heat pipes is that heat transfer occurs due to the fact that the liquid is vaporized in the hot section of the pipe, then condensed in the cold section. The liquid returns to the evaporator due to capillary forces [18–23].

The difficult problems encountered in creating heat pipes are material compatibility.

Research and repair of pipelines using composite materials proves to be highly effective [24–28].

METHODS AND MATERIALS

In all bodies, heat transfer depends on temperature redistribution. For the appearance of heat redistribution, a temperature difference is necessary.

To study the heat effect, an experimental setup is assembled which consists of a thermostat, a heater and a thermocouple. Water in the thermostat at constant temperature is passed through the conductor. A plate heater is used to heat an area of the outer surface of the conductor flow. The temperature in the heated area is determined by a thermocouple whose readings are displayed on multimeters [29–31].

In the experiment, a heat flux acts in the conductor area. Note that the redistribution of the thermal field is influenced by such processes as heat conduction and heat transfer. In heat conduction, heat transfer occurs at the molecular level between different parts of bodies. In Brownian motion of molecules, atoms or nanoparticles colliding with each other, energy transfer takes place between molecules, atoms or nanoparticles respectively. When a current flows through a conductor, power is released, while the current density also increases and all this leads to an increase in heat generation and temperature.

To utilize the redistribution of heat in conductors in calculations, we propose an expression of Fourier's law:

$$q = -\beta T,$$

where β – is the heat conduction coefficient; T – temperature.

As a result of non-uniform heating of the conductor, heat flows are observed. Redistribution of the temperature field is a rather difficult task. Earlier experimental studies have shown that temperature measurement is possible only by the pyrometric method. According to the pyrometric method, the sample under study should be covered with a thin layer of material.

To observe the thermal effect, compounds based on liquid crystal nanoparticles were used. Liquid crystals have a unique property such as fluidity, which is inherent in ordinary liquids.

Based on the electronic spectra, the sizes of liquid crystal nanoparticles were calculated to range from 1.7 nm to 4 nm. The compounds themselves are presented in Table 1.

Table 1 shows that cholesteryloleate was used to obtain liquid crystal compounds in all ratios, to the base of which various acids were added in different quantitative ratios. In this work, the liquid crystal nanoparticle based compound numbered I was used.

The following scheme was used to obtain the experimental compounds. At the beginning, all compounds in the ratios presented in Table 1 were placed in a glass

Table 1
Name of mixture components

Mixtures	Liquid crystal compounds	Quantitative ratios of compounds
I	Cholesteryloleate and hexyloxybenzoic acid	6:2
II	Cholesteryloleate and nonyloxybenzoic acid	3:1
III	Cholesteryloleate and butyloxybenzoic acid	5:2

vessel. In the first case, the particles were stirred with a special glass stick, and the compounds were brought to a homogeneous mass. The second case allowed to obtain a homogeneous distribution of nanoparticles. In the third case, the prepared compounds were heated to the temperature until complete melting.

RESULTS AND DISCUSSION

The obtained compounds were deposited as a thin film on the surface of the conductor (approximately 10 μm). Further on the surface of the conductor, heat dissipation was carried out with the formation of multiple colors. Measurements were carried out using an optical pyrometer, with the heating region taken as the origin of the report.

At the place where heating is carried out, heat absorption occurs. At the same time, the heat field rushes away evenly and gradually. Recall that the distribution of heat is affected by thermal conductivity and heat transfer.

We measured the dependences of temperature change on the surface of the conductor with compounds based on liquid crystal nanoparticles. As a result of the experiment we obtained three dependences of temperature change on the surface of the conductor in the heating zone and in the cooling zone.

Fig. 1 shows the graph of temperature change dependence in the conductor heat effect zone in the absence of liquid motion.

Fig. 2 shows the graph of dependence of temperature redistribution in the conductor heat effect zone when there is fluid motion.

The graphs presented in Figs. 1 and 2 have nonlinear dependences, and all curves have a well-defined maximum, which shifts in the heat effect zone in the presence of fluid motion [32, 33].

From Fig. 3 we can see that at the place where the cooling of the conductor flow is carried out, the graph of the temperature redistribution dependence has asymmetric changes.

Thus, from the conducted experimental studies we obtained the presence of the thermal effect of the liquid [34]. As a result, we note that in the presence of fluid motion and in the absence of fluid motion there is a non-uniform distribution of the temperature field.

The velocity of liquid motion was calculated by the following formula:

$$\upsilon = Q/S, \quad (1)$$

where Q – fluid volume flow rate, m^3/s; S – conductor cross-sectional area, m^2.

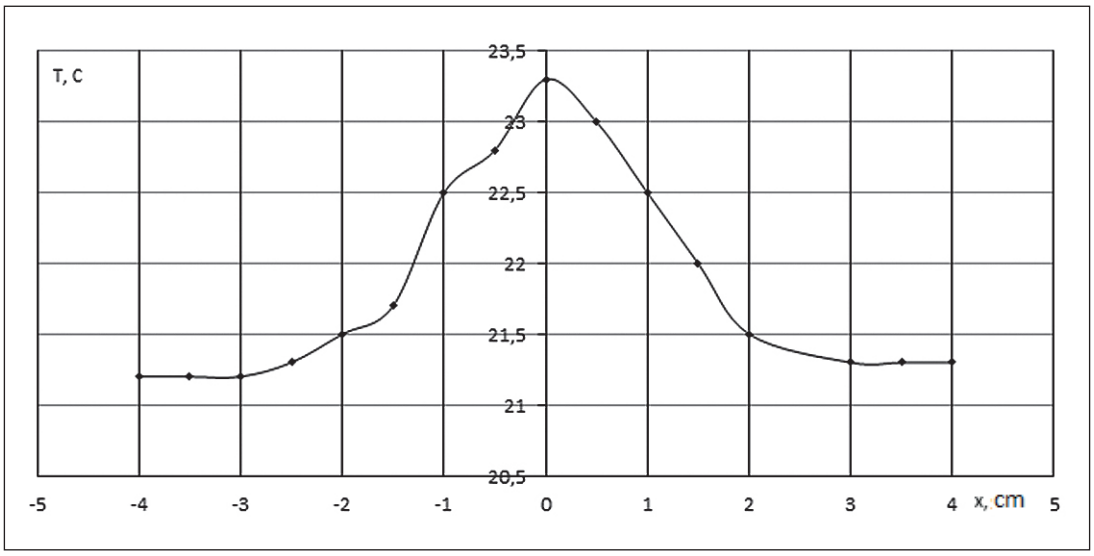

Fig. 1. **Graph of dependence of temperature change in the conductor heat effect zone in the absence of fluid motion**

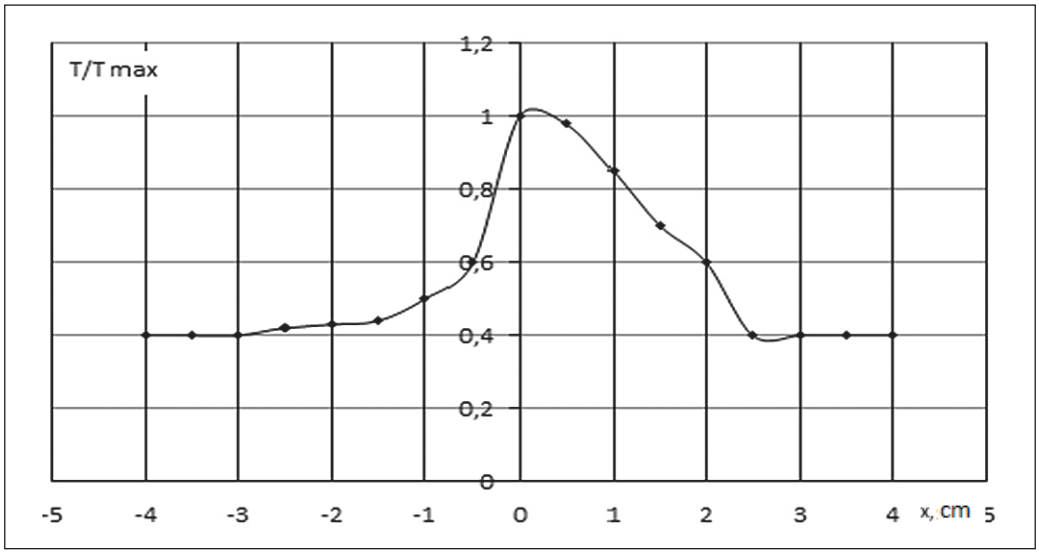

Fig. 2. **Graph of temperature change dependence in the conductor heat flow zone in the presence of fluid motion**

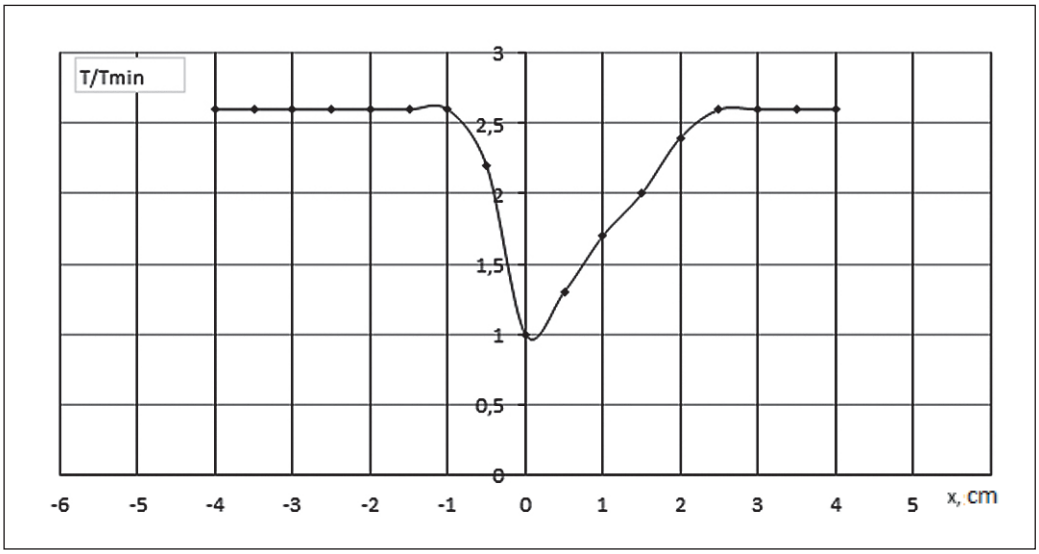

Fig. 3. **Graph of dependence of conductor temperature change in the cooling zone**

The heat flux flow rate was calculated by the formula:

$$Q = V/t, \quad (2)$$

где V – liquid volume, m^3; t – time, s.

To observe the direction of thermal effect, we mathematically calculated the values of liquid velocity υ and liquid volume flow rate Q using the above formulas [35]. The obtained values are presented in the following Table 2.

Using Table 2, we constructed spectra (Fig. 4) of temperature redistribution on the surface of the conductor for different velocities of fluid motion. The first spectrum corresponds to the velocity υ_1 = 0.0995 m/s, the second spectrum corresponds to the velocity υ_2 = 0.0331 m/s and the third spectrum υ_3=1.660 m/s.

Table 2

Characteristics of fluid velocity and fluid volume flow rate

Velocity of the fluid, υ, m/s	Fluid volume flow rate, $Q \cdot 10^{-5}$, m^2/s
0.0995	1.66
0.0331	5.00
1.6600	0.83

From Fig. 4, we can see that with increasing values of fluid velocities the spectra of temperature redistribution and thermal effect narrows.

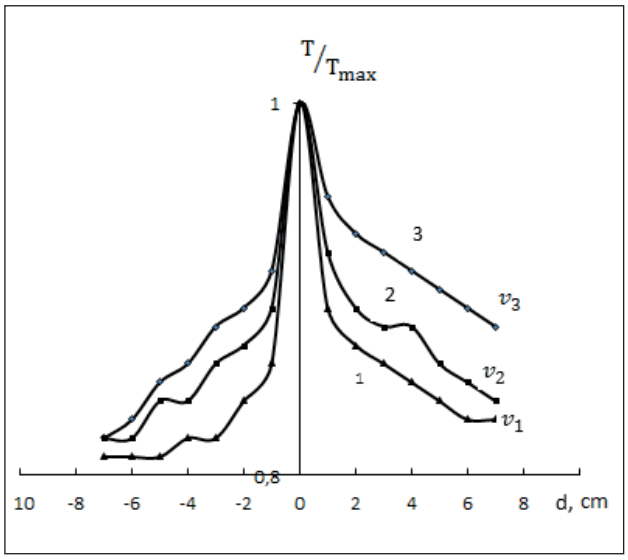

Fig. 4. **Temperature redistribution spectra on the conductor surface for different fluid velocities**

The following graph shows the dependence of the heater power on the conductor surface on the liquid flow velocity (Fig. 5).

As can be seen from Fig. 5, to maintain a constant temperature with increasing velocity, it is necessary to increase the heater power. Up to a velocity of 0.155 m/s, a linear dependence is observed, with further increase in the values of flow velocity, the graph becomes more gentle. Probably, at this point the mode of liquid movement changes.

Analyzing the obtained dependencies, we can mathematically calculate the value of the liquid flow [36].

Consider a liquid with temperature T, which moves in a conductor with transverse surface S. The temperature change of the liquid along the conductor is equal to:

$$dT = (t,x) = \frac{\partial T}{\partial t}dt + \frac{\partial T}{\partial x}dx\,,$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x}\frac{dx}{dt}.$$

Since $dx/dt = \upsilon$, then $dT/dt = (\partial T/\partial t + \partial T/\partial x)\upsilon$.

where $\partial T/\partial t$ – is the particle derivative of temperature by temptation; $(\partial T/\partial x)\upsilon$ – is the convective term characterizing convective heat exchangers.

If the temperature remains constant in time $\partial T/\partial t = 0$, then we obtain the expression:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{v}\cdot\frac{dT}{dt}. \quad (3)$$

According to equation (3), the more the fluid is in motion (increasing velocity), the less heat exchange with the external environment occurs, as shown in Fig. 5. The dependence of the heater power for maintaining a constant temperature on the surface of the flow conduit on the fluid flow velocity is characterized at first by a very rapid increase in power, and then has a linear evolution (decreasing power). This is probably due to the fact that the more the fluid is in motion, the more heat is exchanged by convection.

When heat transfer occurs, multiple colors appear on the surface of the conductor.

Fig. 6 shows the image when there is no fluid movement on the conductor.

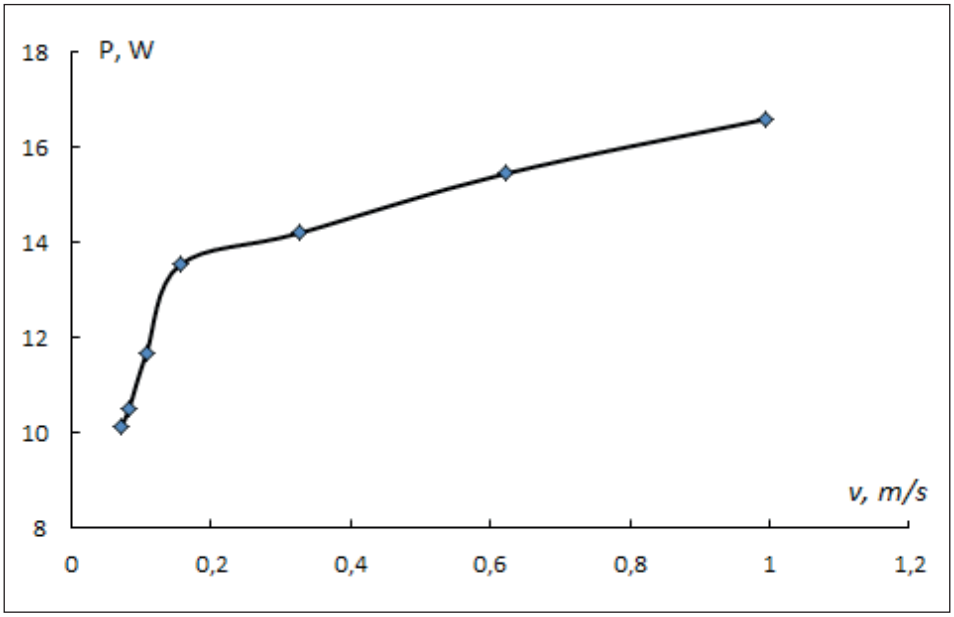

Fig 5. **Graph of dependence of the heater power on the conductor surface on the fluid flow velocity**

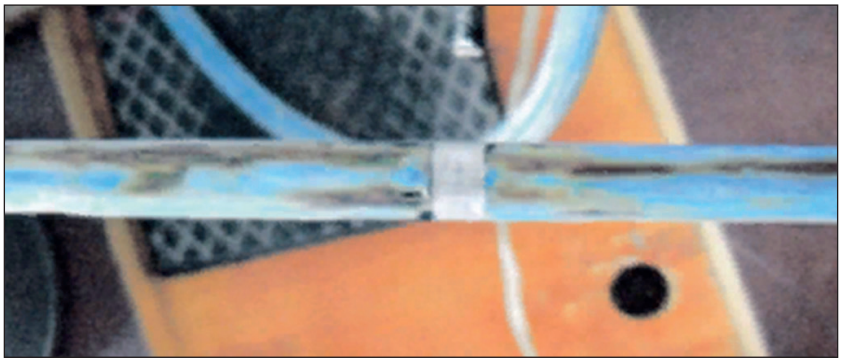

Fig. 6. **Image of heat flow in the absence of heating and fluid motion**

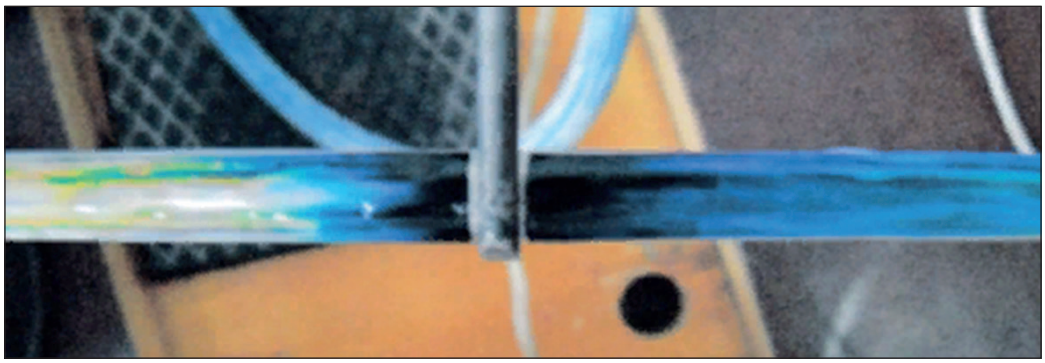

Fig. 7. **Image of heat flow in the presence of fluid motion**

If there is fluid movement in the conductor, heat flow occurs and the image changes (Fig. 7).

From Fig. 7, it can be seen that white color fits the cold zone and blue color fits the warm conductor zone.

Further additionally, the effects of viscosity of liquid crystals from the concentration of nanoparticles are considered in this work. For this purpose, nematic liquid crystals with addition of nanoparticles (*Ta–Si*) with different concentrations have been considered in the study. Here is the structural formula of nematic liquid crystal 4-nitrobenzylidene-4'-heptoxyaniline: $C_7H_{15}–O–C_6H_4–N = CH–C_6H_4–NO_2$.

The concentration of nanoparticles was varied from 0.25% to 3%. Using a laser analyzer, the sizes of *Ta–Si* nanoparticles were determined. The average diameter of *Ta–Si* nanoparticles was found to be about 8 nm. Table 3 shows the results of measurements of viscosity of nematic liquid crystals from the concentration of *Ta–Si* nanoparticles.

It can be seen from Table 3 above that the viscosity of liquid crystals increases with increasing concentration of *Ta–Si* nanoparticles.

Table 3

Results of nematic liquid crystal viscosity measurements on the concentration of *Ta–Si* nanoparticles

Nanoparticle concentration *Ta–Si*, %	Viscosity, *η*, *mPa·s*
Liquid crystal	
0.25	315.1
0.50	354.7
1.00	374.6
2.00	385.2
3.00	433.4

CONCLUSIONS

The compounds based on liquid crystal nanoparticles, namely cholesteryloleate and hexyloxybenzoic acid, were more effective in observing the heat flux.

The above data show that the thermal effect on the surface is not uniformly distributed. Note that the induced local temperature change on the surface of the conductor shows the asymmetry of the temperature field. This further proves the existence of heat flow effect.

As a result of the experimental study, the local temperature change of the conductor flux surface has been shown.

The above method can be applied to effectively determine the flow direction in the case of opaque conductor walls.

Compounding of nanoparticles leads to a change in the viscosity of liquid crystals.

REFERENCES

1. Tretyakov Yu.D. Problems of nanotechnology development in Russia and abroad. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2007; 77(1): 3–10. (in Russian)

2. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow: Fizmatlit. 2005; 416. (in Russian)

3. Andrievskiy R.A., Ragulia A.V. *Nanostructured Materials*. Moscow: Izd. Center "Academy". 2005; 192. (in Russian)

4. *Non-Destructive Testing. Handbook*: In 7 volumes. Volume 3. Edited by Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. V.V. Klyuev. Moscow: Mechanical Engineering. 2004; 864. (in Russian)

5. Rumyantsev S.V. *Handbook on Non-Destructive Testing Methods*. Moscow: Energoizdat. 1982; 210. (in Russian)

6. Wigleb G. *Sensors. Design and application*. Translated from German. Mir. 1989. (in Russian)

7. *Instruments for Measuring the Flow Rate of Steam, Liquid and Gas* [Electronic resource]. URL: https://lms.kgeu.ru/pluginfile.php?file=%2F326605%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F%D0%A0%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4.pdf. (in Russian)

8. Terekhov A.V. Development of Methods and Means of Non-Destructive of Thetrmophysical Characteristics and Thickness of Protective Coatings of Materials and Products: *Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences*: 05.11.13. Terekhov Alexey Vasilievich. Tambov. 1997; 18. (in Russian)

9. *Theory of Heat Transfer*: *Textbook* / L.A. Tkachenko, A.V. Repina; edited by Prof. N.F. Kashapov. Kazan: Kazan University Publishing House. 2017; 151. (in Russian)

10. Nashchokin, V.V. *Technical Thermodynamics and Heat Transfer: Textbook* by V.V. Nashchokin. Moscow: Book on Demand. 2013; 496. (in Russian)

11. Zakharova A.A. *Technical Thermodynamics and Heat Engineering: Textbook,* 2nd ed. Moscow: Academy. 2008; 272. (in Russian)

12. Kobelkov V.N. *Thermodynamics and Heat Transfer*. Moscow: Zhukovsky National Aerospace University. 2012; 328. (in Russian)

13. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefanyuk E.V. *Technical Thermodynamics and Heat Transfer*: *Textbook for Academic Bachelor's Degree*, 3th edition, revised and expanded. Moscow: Yurayt Publishing House. 2015; 566. (in Russian)

14. Chi S. *Heat Pipes: Theory and Practice*. Translated from English by V.Ya. Sidorov. Moscow: Mechanical engineering. 1981; 207. (in Russian)

15. Dan P.D., Ray D.A. *Heat Pipes*. Translated from English by Yu.A. Zeigarnik. Moscow: Energy, 1979. 272. (in Russian)

16. *Heat Pipes*. Edited by E.E. Shpilrain. Moscow: Mir. 1972; 420. (in Russian)

17. Chernysheva M.A., Maydanik Yu.F. Modeling of heat and mass transfer in a cylindrical evaporator of a contour heat pipe with a rectangular interface. *High Temperature*. 2021; 59, 3: 362–372. (in Russian)

18. Moskvin Yu.V., Filippov Yu.N. Heat Pipes. *High Temperature*. 1969; 7(4): 766–775. (in Russian)

19. Papchenkov A.I. Experimental Studies of the Heat Engineering Characteristics of Boiler-Utilizer Thermosiphons. *Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences*, specialty 05.14.04. Ekaterinburg. 2018; 146. (in Russian)

20. Lykov A.V. *Heat conduction theory*. Moscow: Higher School. 1967; 600. (in Russian)

21. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat Transfer*: *Textbook for Universities*. Moscow: Energoizdat. 1981; 416. (in Russian)

22. Ivanovskiy M.N., Sorokin V.P., Yagodkin I.V. *Physical fundamentals of heat pipes*. Moscow: Atomizdat. 1978; 256. (in Russian)

23. Vasiliev L.L. *Heat Exchangers on Heat Pipes*. Minsk: Science and Technology. 1981; 143. (in Russian)

24. *Composite Materials*: *Handbook*. V.V. Vasiliev [et al.]; Ed. by V.V. Vasiliev, Yu.M. Tarnopolsky. Moscow: Mechanical Engineering. 1990; 512. (in Russian)

25. Kristensen R.M. *Introduction to Composite Mechanics*. Moscow: Mir, 1990. 336. (in Russian)

26. Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I., Piraynen V.Yu. *Special materials in Mechanical Engineering*: *Textbook for Universities*. Moscow: Khimizdat. 2014; 638. (in Russian)

27. Popov A.Yu., Gosina K.K., Petrov I.V., Makarova A.E., Balova D.G., Pepelyaev A.V. Classification, Composition, Advantages and Disadvantages of Multicomponent Composite Materials. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015; 3(143): 42–45. (in Russian)

28. Vorobyov I.N. Advantages of Using Composite Materials in Pipeline Repairs. *Exposition Oil Gas*. 2013; 7(32): 47–50. (in Russian)

29. Rakhmatullina R.G., Garayshin A.I., Maskova A.R. Experimental Determination of the Heat Exchange Coefficient – Thermal Conductivity – for Fluorine-Containing Polymers. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2022. Vol. 78(1): 27–30 (in Russian)

30. Altunin V.A., Davlatov N.B. Experimental Base and Methodologies for Studying the Thermal-physical Properties of Liquid Pure Hydrazine and its Mixtures with Non-Metallic Additives – Fullerenes. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2019; 3: 30–38. (in Russian)

31. Kokhanova Yu.S., Kuimov R.A., Ley I.A. Determination of the Dependence of the Heat Transfer Coefficient and Critical Heat Flux on the Geometric Parameters of Three-Dimensional Microstructured Surfaces Obtained by the Method of Deforming Cutting During Boiling of Various Liquids. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2020; 4: 12–17. (in Russian)

32. Yagov V.V. *Heat Transfer in Single-phase Media and During Phase Transformations*. Moscow: MEI. 2014; 542. (in Russian)

33. Gotovsky M.A., Suslov V.A. *Heat and Mass Transfer in Technological Installations New Pulp and Paper Industry*: *Textbook*. Part 3. St. Petersburg. St. Petersburg GTU RP. 2013; 120. (in Russian)

34. Suslov V.A., Antufiev S.V. *Heat and Mass Transfer Equipment of Thermal Power Plants and Nuclear Power Plants*: *Textbook Allowance*. St. Petersburg. St. Petersburg GTU RP. 2015; 84. (in Russian)

35. Loparev A.A. *Application of Heat in Agriculture. Collection of Problems. Educational-Methodical Manual for Students of the Engineering Faculty*. Kirov: Agricultural Academy. 2000; 95. (in Russian)

36. Koshyakov N.S., Gliner-Smirnov M.M. *Equations of mathematical Physics in Partial Derivatives*. Moscow: Higher School. 1970; 712. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rezida G. Rakhmatullina – Cand. Sci. (Eng.) Associate Professor, Physics and Mathematics Department, Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia, rachmatrg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9658-3631

Nestor Njiya – Assistant, Kazan Federal University, Kazan, Russia, nestornjiya@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2555-7128

Alexei A. Rusinov – Master's student, Highways and Construction Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, rogozhina864@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-7608-3243

Albina R. Maskova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, asunasf@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8171-8027

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Rezida G. Rakhmatullina – scientific guidance; development of research methodology; drawing up a plan of experimental work; conducting experimental work; processing the results of the experiment; writing the source text; conclusions of the article.

Nestor Njiya – identifying dependencies; analysis and processing of the results; writing the draf.

Alexei A. Rusinov – collection of materials.

Albina R. Maskova – development of research methodology; scientific text editing; revision of the text.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 28.04.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Научная статья
УДК 536.24
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242

CC BY 4.0

Исследование теплового эффекта на основе наночастиц жидких кристаллов

Резида Гайфулловна Рахматуллина[1], Нестор Нжийа[2], Алексей Анатольевич Русинов[3], Альбина Рафитовна Маскова[3]*

[1] Казанский государственный аграрный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия
[2] Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия
[3] Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: asunasf@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время активно занимаются разработкой композитных систем, допированных наночастицами и на основе жидкокристаллических (ЖК) сред. Последние, обладая уникальными свойствами, могут применяться для совершенствования различных ЖК-устройств. Для этого очень важно исследовать механизм изменения свойств жидкокристаллических систем от размеров и концентрации наночастиц. В последнее время применяется достаточное количество методов для измерения потока жидкости или газа, основанных на разных физических принципах. Информацию о среднем массовом расходе жидкости или газа позволяет получить метод измерения, основанный на стационарной инжекции тепла в поток. Среднюю скорость потока позволяют измерить электромагнитные и ультразвуковые датчики, а средний объемный расход – гидродинамический (аэродинамический), а также механический турбинный методы. В процессе теплопереноса и массопереноса конвективное движение в жидкой среде играет важную роль в подавляющем большинстве природных явлений и технологических процессов. Многие процессы конвективного массопереноса и теплопереноса в химической, нефтехимической, строительной, атомной и других отраслях промышленности осуществляются в тепловых трубах. До настоящего времени также остается открытым вопрос об эффективно¬сти применения тепловых труб с корпусами из композиционных материалов. В представленной работе были поставлены следующие цели: собрать экспериментальную установку для изучения теплового эффекта (потока), провести исследования изменения температуры на поверхности проводника соединения на основе наночастиц жидких кристаллов и вязкости жидких кристаллов от концентрации наночастиц. **Методы и материалы.** В данной экспериментальной работе в области внешней границы проводника действует тепловой поток. Отметим, что на перераспределение теплового поля влияют такие процессы, как теплопроводность и теплоотдача. Для наблюдения теплового эффекта использовались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов. Наноструктурные системы жидких кристаллов обладают таким уникальным свойством, как текучесть, присущим обычным жидкостям. Для непрозрачных стенок проводника предложен способ определения направления теплового потока. Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что измерение температуры возможно только пирометрическим методом. Поэтому перераспределение изменения температуры на поверхности потока проводника зафиксировано с помощью оптического пирометра, воспринимающего тепловое (инфракрасное) излучение. В данной работе в качестве основы использовалось соединение на основе наночастиц жидких кристаллов, а именно с добавлением холестерилолеата. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования экспериментально получены зависимости температуры в зоне теплового потока проводника при отсутствии и при наличии движения жидкости. Измерены зависимости изменения температуры на поверхности проводника с соединениями на основе наночастиц жидких кристаллов. Показано неоднородное перераспределение теплового поля. Представлены результаты исследования зависимости вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц. **Заключение.** Приведенные выше данные показывают, что тепловой эффект на поверхности распределен неравномерно. Для визуализации теплового эффекта более эффективными оказались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов. Разработана методика, позволяющая определить направление и вычислить математически величину теплового потока жидкости в непрозрачном потоке проводника. Отметим, что при соединении наночастиц вязкость жидких кристаллов меняется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вязкость, движение жидкости, жидкие кристаллы, концентрация, наноструктурные системы, наночастицы, проводник, температура, температурная неоднородность, тепловой эффект.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Рахматуллина Р.Г., Нжийа Н., Русинов А.А., Маскова А.Р. Исследование теплового эффекта на основе наночастиц жидких кристаллов // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 235–242. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242. – EDN: HCIGHR.

© Рахматуллина Р.Г., Нжийа Н., Русинов А.А., Маскова А.Р., 2024

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурные и высокодисперсные системы обладают химическими, электрическими, магнитными, механическими, оптическими и другими свойствами. Образование наностуктурных систем может привести к изменению физических свойств, а именно изменить предел прочности, текучести, теплоемкость, температуру, магнитные переходы и т.д., поэтому, обладая уникальными свойствами, широко привлекают внимание специалистов в области физики, химии, материаловедения, биологии [1–3].

В настоящее время известно, что течение жидкостей и газов по водопроводным, нефтепроводным и газопроводным трубам встречается во многих областях промышленности. Физико-химические законы течения жидкостей и газов оказывают важную роль на протекание процесса разделения.

В непрозрачных проводниках появляется задача определения направления, измерения величины потока жидкости и расхода потока объема жидкости в проводниках. Имеется несколько способов определения теплового эффекта и температуры [4–8]. В данной работе измерение теплового эффекта проводилось пирометрическим способом.

Рассмотрим два тела, приведем их в соприкосновение и будем нагревать.

Мы знаем, что при этом температура будет изменяться во времени. Соприкосновение тел приводит к увеличению движения мельчайших частиц, и, соответственно, будет происходить обмен энергией между мельчайшими частицами. Обмен энергией, передаваемой между мельчайшими частицами от более горячего тела к более холодному, называют тепловым эффектом (потоком). Таким образом, теплота распространяется от точки с более высокой температурой к точке с более низкой температурой во всех направлениях. Для возникновения теплового эффекта в различных поверхностях пространства достаточно в этих поверхностях создать разные температуры с наличием разности температур [9–13].

Тепловые трубы – важнейшие элементы теплоэнергетических установок, представляющие собой автономные, герметично-замкнутые, двухфазные теплопередающие устройства. Перечислим преимущественные достоинства: простота конструкции, способность выдерживать большие тепловые потоки при незначительных перепадах температуры, небольшая масса, тепловая труба может работать в широком интервале температур, к тому же теплопроводящие свойства тепловых труб выше, чем у самых теплопроводных металлов [14–19].

Принцип действия тепловых труб заключается в том, что перенос тепла происходит за счет того, что в горячем участке трубы жидкость испаряется, потом конденсируется на холодном участке. Жидкость возвращается в испаритель за счет капиллярных сил [18–23].

При создании тепловых труб возникают трудно решаемые проблемы – это совместимость материалов.

Исследование и ремонт трубопроводов с использованием композитных материалов доказывает свою высокую эффективность [24–28].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Во всех телах перенос теплоты зависит от перераспределения температуры. Для появления перераспределения теплоты необходима разность температур.

Для изучения теплового эффекта собрана экспериментальная установка, которая состоит из термостата, нагревателя и термопары. Вода в термостате при постоянной температуре пропускается через проводник. Для нагревания участка внешней поверхности потока проводника используется нагреватель с пластиной. Температура в области нагрева определяется термопарой, показания которой выводятся на мультиметры [29–31].

В эксперименте в зоне проводника действует тепловой поток. Отметим, что на перераспределение теплового поля влияют такие процессы, как теплопроводность и теплоотдача. При теплопроводности перенос теплоты происходит на молекулярном уровне между различными частями тел. При броуновском движении молекул, атомов или наночастиц, при столкновении друг с другом происходит перенос энергии соответственно между молекулами, атомами или наночастицами. Когда по проводнику течет ток, выделяется мощность, при этом плотность тока также увеличивается, и все это приводит к увеличению выделения теплоты и температуры.

Для использования перераспределения теплоты в проводниках в расчетах нами предложено выражение закона Фурье:

$$q = -\beta T,$$

где β – коэффициент теплопроводности; T – температура.

В результате неравномерного нагревания проводника наблюдаются тепловые потоки. Перераспределение температурного поля является довольно сложной задачей. Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что измерение температуры возможно только пирометрическим методом. Согласно пирометрическому методу, исследуемый образец должен покрываться тонким слоем материала.

Для наблюдения теплового эффекта использовались соединения на основе наночастиц жидких кри-

Таблица 1
Наименование соединений на основе наночастиц жидких кристаллов

№	Соединения жидких кристаллов	Количественные соотношения соединений
I	Холестерилолеат и гексилоксибензойная кислота	6:2
II	Холестерилолеат и нонилоксибензойная кислота	3:1
III	Холестерилолеат и бутилоксибензойная кислота	5:2

сталлов. Жидкие кристаллы обладают уникальным свойством, таким, как текучесть, которая присуща обычным жидкостям.

На основании электронных спектров были рассчитаны размеры наночастиц жидких кристаллов в пределах от 1,7 до 4 нм. Сами соединения представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что для получения соединений жидких кристаллов во всех соотношениях применялся холестерилолеат, в основу которого добавлялись различные кислоты в разных количественных соотношениях. В данной работе использовалось соединение на основе наночастиц жидких кристаллов под номером I.

Для получения экспериментальных соединений использовалась следующая схема. В начале все соединения в представленных в табл. 1 соотношениях помещались в стеклянный сосуд. В первом случае частицы перемешивались специальной стеклянной палочкой, и соединения доводились до однородной массы. Второй случай позволил получить однородное распределение наночастиц. В третьем случае приготовленные соединения нагревались до температуры до полного расплавления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные соединения наносились тонкой пленкой на поверхность проводника (приблизительно 10 мкм). Далее на поверхности проводника осуществлялась теплоотдача с образованием многокрасочных цветов. Измерения проводились при помощи оптического пирометра, за начало отчета взята область нагрева.

На месте, где осуществляется нагрев, происходит поглощение тепла. При этом тепловое поле устремляется ровно и постепенно. Напомним, что на распределение тепла влияют теплопроводность и теплоотдача.

Нами были измерены зависимости изменения температуры на поверхности проводника с соединениями на основе наночастиц жидких кристаллов. В результате эксперимента получили три зависимости изменения температуры на поверхности проводника в зоне нагревания и в зоне охлаждения.

На рис. 1 приведен график зависимости изменения температуры в зоне теплового эффекта проводника в отсутствии движения жидкости.

На рис. 2 представлен график зависимости перераспределения температуры в зоне теплового

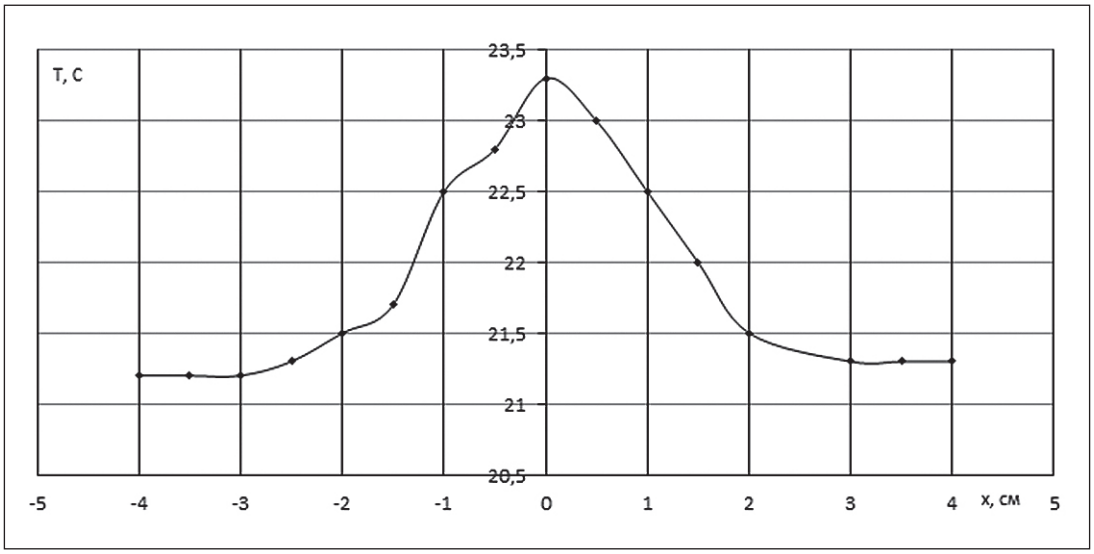

Рис. 1. **График зависимости изменения температуры в зоне теплового эффекта проводника в отсутствии движения жидкости**

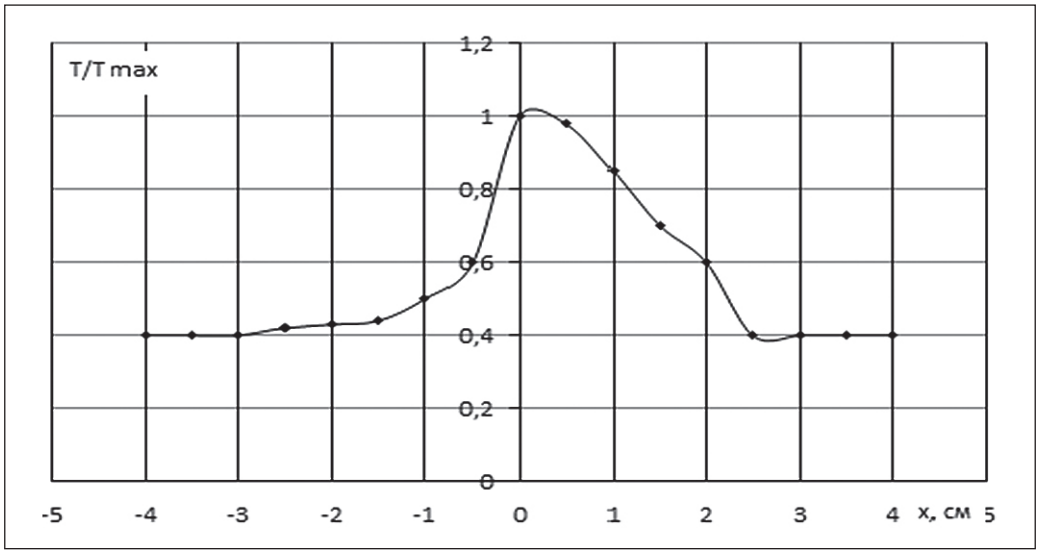

Рис. 2. **График зависимости изменения температуры в зоне теплового потока проводника в присутствии движения жидкости**

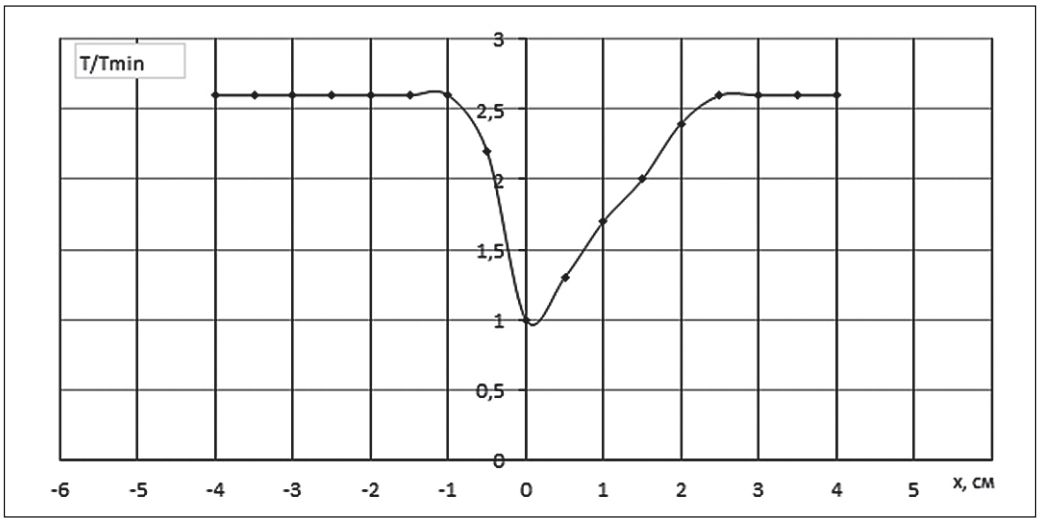

Рис. 3. **График зависимости изменения температуры проводника в зоне охлаждения**

эффекта проводника, когда присутствует движение жидкости.

Представленные на рис. 1 и 2 графики имеют нелинейные зависимости, и на всех кривых имеется четко выраженный максимум, который в зоне теплового эффекта в присутствии движения жидкости смещается [32, 33].

Из рис. 3 видно, что на месте, где осуществляется охлаждение потока проводника, график зависимости перераспределения температуры имеет ассиметричные изменения.

Таким образом, из проведенных экспериментальных исследований получили наличие теплового эффекта жидкости [34]. В результате отметим, что при наличии движения жидкости и в отсутствии движения жидкости наблюдается неравномерное распределение температурного поля.

Скорость движения жидкости рассчитали по следующей формуле:

$$\upsilon = Q/S, \quad (1)$$

где Q – расход потока объема жидкости, м^3/с; S – площадь поперечного сечения проводника, м^2.

Расход теплового потока рассчитали по формуле:

$$Q = V/t, \quad (2)$$

где V – объем жидкости, м^3; t – время, с.

Таблица 2
Характеристики скорости движения и расхода потока объема жидкости

Скорость движения жидкости, v, м/с	Расход потока объема жидкости, $Q \cdot 10^{-5}$, м²/с
0,0995	1,66
0,0331	5,00
1,6600	0,83

Для наблюдения направления теплового эффекта математически рассчитали по вышепоказанным формулам величины скорости движения жидкости v и расход потока объема жидкости Q [35]. Полученные значения представлены в следующей табл. 2.

Используя табл. 2, построили спектры (рис. 4) перераспределения температур на поверхности проводника для различных скоростей движения жидкости. Первому спектру соответствует скорость v_1 = 0,0995 м/с, второму спектру соответствует скорость v_2 = 0,0331м/с и третьему спектру – v_3=1,660 м/с.

Из рис. 4 видно, что с повышением значений скоростей движения жидкости спектры перераспределения температур и тепловой эффект сужается.

В следующем графике приведена зависимость мощности нагревателя на поверхности проводника от скорости потока жидкости (рис. 5).

Как видно из рис. 5, для поддержания постоянной температуры с увеличением скорости надо увеличивать мощность нагревателя. До скорости 0,155 м/с наблюдается линейная зависимость, при дальнейшем увеличении значений скорости потока график становится более пологим. Возможно, в этой точке изменяется режим движения жидкости.

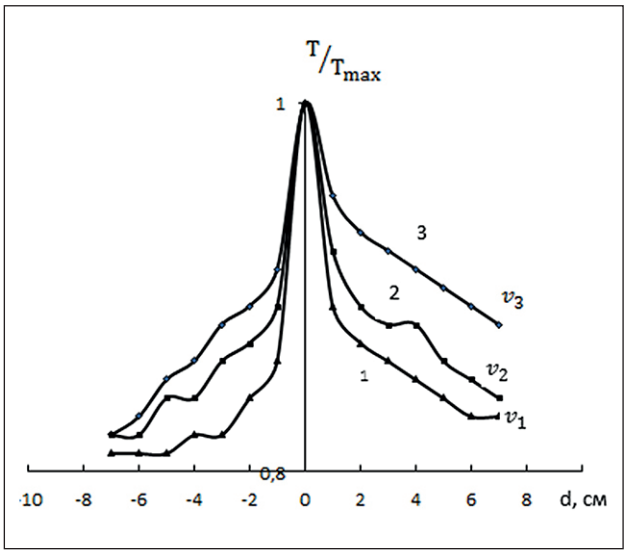

Рис. 4. **Спектры перераспределения температур на поверхности проводника для различных скоростей движения жидкости**

Анализируя полученные зависимости, можно математически вычислить величину потока жидкости [36].

Рассмотрим жидкость с температурой T, которая движется в проводнике с поперечной поверхностью S. Изменение температуры жидкости вдоль проводника равно:

$$dT = (t,x) = \frac{\partial T}{\partial t}dt + \frac{\partial T}{\partial x}dx\,,$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x}\frac{dx}{dt}.$$

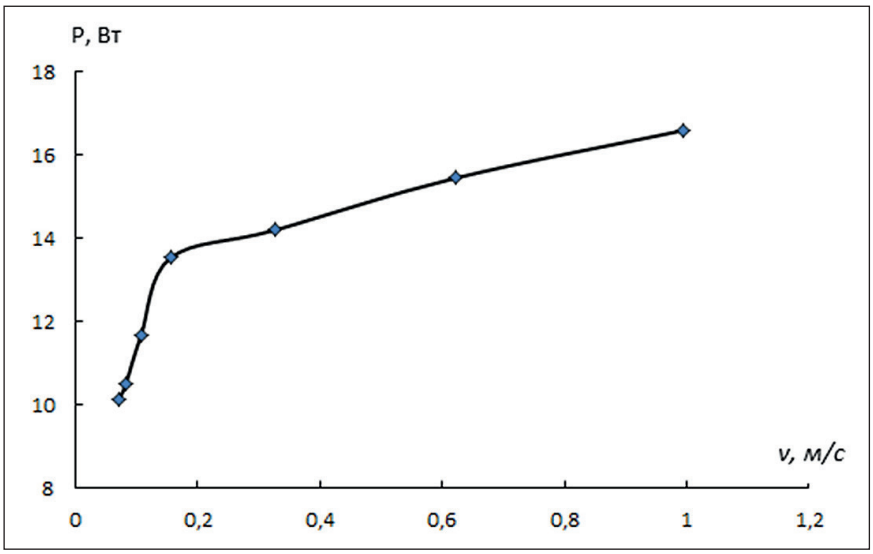

Рис. 5. **График зависимости мощности нагревателя на поверхности проводника от скорости потока жидкости**

Так как $dx/dt = \upsilon$, тогда $dT/dt = (\partial T/\partial t + \partial T/\partial x)\upsilon$, где $\partial T/\partial t$ – производная температуры по искушению; $(\partial T/\partial x)\upsilon$ – конвективный член, характеризующий конвективные теплообменники.

Если температура остается постоянной во времени, то $\partial T/\partial t = 0$, тогда получим выражение:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{v} \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), чем больше жидкость находится в движении (увеличение скорости), тем меньше происходит теплообмен с внешней средой, как показано на рис. 5. Зависимость мощности нагревателя для поддержания постоянной температуры на поверхности потокопроводника от скорости потока жидкости вначале характеризуется очень быстрым ростом мощности, а далее имеет линейную эволюцию (уменьшение мощности). Возможно, это связано с тем, что чем больше жидкость находится в движении, тем больше происходит обмен тепла путем конвекции.

При теплоотдаче на поверхности проводника появляются многокрасочные цвета.

На рис. 6 показано изображение, когда нет движения жидкости по проводнику.

Если в проводнике происходит движение жидкости, то имеет место тепловой поток и изображение при этом меняется (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что белому цвету подходит холодная зона, а синему цвету подходит теплая зона проводника.

Далее дополнительно в данной работе рассмотрены влияния вязкости жидких кристаллов от концентрации наночастиц. Для этого в рамках исследования были рассмотрены нематические жидкие кристаллы с добавлением наночастиц (*Ta–Si*) с различными концентрациями. Приведем структурную формулу нематического жидкого кристалла 4-нитробензилиден-4'-гептоксианилин: C_7H_{15}–O–C_6H_4–N = CH–C_6H_4–NO_2.

Изменяли концентрацию наночастиц от 0,25 до 3%. С помощью лазерного анализатора определили размеры наночастиц *Ta–Si*. Средний диаметр наночастиц *Ta–Si* получился около 8 нм. В табл. 3 приведены результаты измерений вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц *Ta–Si*.

Таблица 3

Результаты измерений вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц *Ta–Si*

Концентрация наночастиц *Ta–Si*, %	Вязкость, *η, мПа·с*
Жидкий кристалл	
0,25	315,1
0,50	354,7
1,00	374,6
2,00	385,2
3,00	433,4

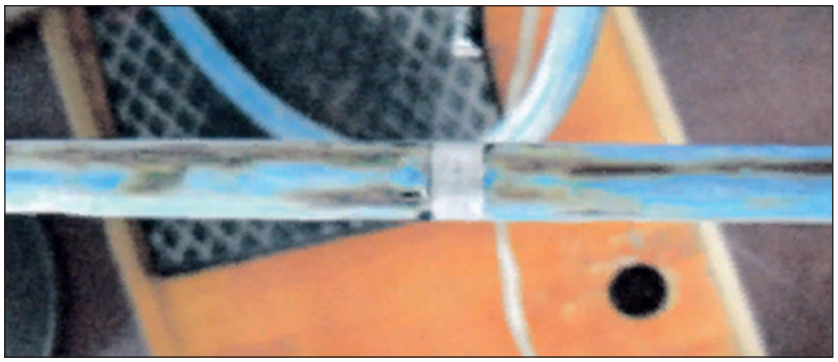

Рис. 6. **Изображение теплового потока при отсутствии нагрева и движения жидкости**

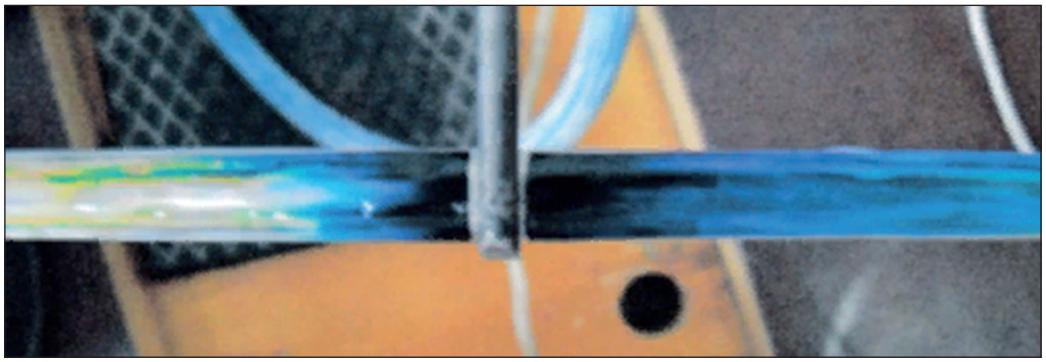

Рис. 7. **Изображение теплового потока в наличии движения жидкости**

Из приведенной выше табл. 3 видно, что с увеличением концентрации наночастиц *Ta–Si* вязкость жидких кристаллов увеличивается.

ВЫВОДЫ

При наблюдении теплового потока более эффективными оказались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов, а именно хлестерилолеат и гексилоксибензойная кислота.

Приведенные выше данные показывают, что тепловой эффект на поверхности распределен неравномерно. Отметим, что вызванное локальное изменение температуры на поверхности проводника показывает несимметричность температурного поля. Это еще раз доказывает существование эффекта теплового потока.

В результате экспериментального исследования было показано локальное изменение температуры поверхности потока проводника.

Приведенный способ можно применить для эффективного определения направления потока в случае непрозрачных стенок проводника.

Соединение наночастиц приводит к изменению вязкости жидких кристаллов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков Ю.Д. Проблемы развития нанотехнологий в России и за рубежом // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77. № 1. С. 3–10.
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
3. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Изд. Центр «Академия», 2005. 192 с.
4. Неразрушающий контроль. Справочник: в 7 томах. Том 3. Под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
5. Румянцев С.В. Справочник по методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 210 с.
6. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение: пер. с нем. Мир. 1989.
7. Приборы измерения расхода пара, жидкости и газа [Электронный ресурс]. URL: https://lms.kgeu.ru/plugin-file.php?file=%2F326605%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F%D0%A0%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4.pdf.
8. Терехов А.В. Разработка методов и средств неразрушающего контроля теплофизических характеристик и толщины защитных покрытий материалов и изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Терехов Алексей Васильевич. Тамбов. 1997. 18 с.
9. Теория теплообмена: учеб. пособие / Л.А. Ткаченко, А.В. Репина; под общ. ред. проф. Н.Ф. Кашапова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. 151 с.
10. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. М.: Книга по требованию, 2013. 496 с.
11. Захарова А.А. Техническая термодинамика и теплотехника: учеб. пособие. 2-е изд. М.: Академия, 2008. 272 с.
12. Кобельков В.Н. Термодинамика и теплопередача. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2012. 328 с.
13. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для академического бакалавриата. – 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 566 с.
14. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика: пер. с англ. В.Я. Сидорова. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
15. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. Ю.А. Зейгарник. М.: Энергия, 1979. 272 с.
16. Тепловые трубы: под ред. Э.Э. Шпильрайна. М.: Мир, 1972. 420 с.
17. Чернышева М.А., Майданик Ю.Ф. Моделирование тепломассопереноса в цилиндрическом испарителе контурной тепловой трубы с прямоугольным интерфейсом // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 3. С. 362–372.
18. Москвин Ю.В., Филиппов Ю.Н. Тепловые трубы // ТВТ. 1969. 7:4. С. 766–775.
19. Папченков А.И. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик термосифонов котлов-утилизаторов: дис. канд. техн. наук: 05.14.04. Екатеринбург. 2018. 146 с.
20. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
21. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
22. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
23. Васильев Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
24. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
25. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1990. 336 с.

26. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов. М.: Химиздат, 2014. 638 с.

27. Попов А.Ю., Госина К.К., Петров И.В., Макарова А.Е., Балова Д.Г., Пепеляев А.В. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 42–45.

28. Воробьев И.Н. Преимущество применения композитных материалов при ремонте трубопроводов // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 7 (32). С. 47–50.

29. Рахматуллина Р.Г., Гарайшин А.И., Маскова А.Р. Экспериментальное определение показателя теплообмена – теплопроводности – для фторсодержащих полимеров // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2022. Т. 78. № 1. С. 27–30.

30. Алтунин В.А., Давлатов Н.Б. Экспериментальная база и методики проведения исследований теплофизических свойств жидкого чистого гидразина и его смесей с неметаллическими добавками – фуллеренами // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2019. № 3. С. 30–38.

31. Коханова Ю.С., Куимов Р.А., Лэй И.А. Определение зависимости коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков от геометрических параметров трехмерных микроструктурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, при кипении различных жидкостей // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 12–17.

32. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 542 с.

33. Готовский М.А., Суслов В.А. Тепломассообмен в технологических установках ЦБП: учеб. пособие. Часть 3. СПб.: СПб. ГТУ РП, 2013. 120 с.

34. Суслов В.А., Антуфьев С.В. Тепломассообменное оборудование ТЭС и АЭС: учеб. пособие. СПб.: СПб. ГТУ РП, 2015. 84 с.

35. Лопарев А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. Сборник задач. Учеб.-метод. пособие для студентов инженерного факультета. Киров: Сельхозакадемия, 2000. 95 с.

36. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахматуллина Резида Гайфулловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и математика», Казанский государственный аграрный университет, Республика Татарстан, Казань, Россия, rachmatrg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9658-3631

Нжийа Нестор – ассистент, Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия, nestornjiya@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2555-7128

Русинов Алексей Анатольевич – магистр кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, rogozhina864@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-7608-3243

Маскова Альбина Рафитовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, asunasf@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8171-8027

ВКЛАД АВТОРОВ

Рахматуллина Р.Г. – научное руководство; разработка методологии исследования; составление плана экспериментальных работ; проведение экспериментальных работ; обработка результатов эксперимента; написание исходного текста; выводы статьи.

Нжийа Н. – выявление зависимостей; анализ и обработка полученных результатов; написание исходного текста.

Русинов А.А. – сбор материала.

Маскова А.Р. – разработка методологии исследования; научное редактирование текста; доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.04.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.

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 4th 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 academician of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory's academic committee, and Professor Fu ZhengYi, an academician 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 academician of the Chinese Academy of Sciences, two academicians of the Chinese Academy of Engineering, one academician of the Royal Academies for Science and the Arts of Belgium, two academicians of the European Academy of Sciences and Arts, one academician of the Australian Academy of Technology and Engineering, one academician 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 m² 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^2. 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 «Top 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 программой «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 международный 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 предприятий, 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 удостаивается 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 технологии. 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», нанокомпозитную 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, нанокомпозитных 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, нанокомпозитная 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 академий 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 проектирования 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^2, 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^2 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 технологическим 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 Хунгшан, 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/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256

CC BY 4.0

The study of CO_2 impact on the formation of nanoscale structures and the physical and mechanical properties of concrete

Albert A. Zalyatdinov, Renat U. Kamenov*, Denis S. Rechenko
Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia
* Corresponding author: e-mail: renatkamenov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. In the context of the global fight against climate change, the reduction of CO_2 emissions and its utilization is a topical theme. One of the promising directions is the utilization of CO_2 in construction, in particular, in concrete production. The present research investigates the effect of carbon dioxide on the formation of nanoscale structure and physical and mechanical properties of concrete mixtures. **Methods and Materials.** A special unit for mixing cement, sand, water and CO_2 under pressure was developed for the research. The obtained concrete specimen were subjected to compressive and flexural strength tests using MATEST E161-03N automatic dual range testing press. The microstructure of the specimen was also analyzed using scanning electron microscope (SEM). **Discussion.** The experimental results showed that the introduction of CO_2 into the concrete mixture promotes the formation of nanoscale structure, which improves its strength properties up to a certain pressure. With further increase in pressure, deterioration of these characteristics is being observed. Additional mixing time and increase in water volume also affect the strength of concrete and its microstructure. **Conclusion.** The use of CO_2 in concrete production can significantly reduce the carbon footprint of construction materials and improve their physical and mechanical properties due to the formation of nanoscale structure. Further research and optimization of mixing parameters are necessary to create stronger and more stable concrete mixtures.

KEYWORDS: nanoscale structure, carbon dioxide utilization, concrete strength, carbonization, carbon dioxide, ecology.

FOR CITATION:
Zalyatdinov A.A., Kamenov R.U., Rechenko D.S. The study of CO_2 impact on the formation of nanoscale structures and the physical and mechanical properties of concrete. *Nanotechnologies in Construction.* 2024; 16(3): 249–256. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256. – EDN: DZJPZF.

INTRODUCTION

Today, one of the world trends aimed at improving the standard of living and preserving the planet is the fight against climate change and its consequences, which is also due to the great challenge of the strategy of scientific and technological development of the Russian Federation (Presidential Decree No. 642 of 01.12.2016), associated with the depletion of natural resources and environmental degradation [1]. This is directly related to the carbon neutrality of production activities and compensation of enterprise emissions through carbon-negative projects and technologies. Enterprise emissions are divided into three categories: direct emissions during production; emissions obtained due to energy consumption (coal plant, nuclear power plant, hydroelectric power plant, etc.) and emissions obtained during the life cycle of goods (purchase of raw materials, delivery, storage, use, disposal, etc.). The last two categories are indirect emissions and require serious systematic development of carbon accounting. It should be noted that the first category, which includes greenhouse gases, is the most significant and manufacturing companies are focused on reducing this category. At the same time 77.9% in the structure of emissions is energy, 11.8% – industry (production), 5.7% – agriculture and 4.6% – waste, and in the structure of emitted gases carbon dioxide (CO_2) makes 79.2%, methane (CH_4) – 14.5%, nitrogen oxide (N_2O) – 4.2%, hydrofluorocarbons (HFC) – 1.9%, perfluorocarbons (PFC) and sulfur hexafluoride (SF6) 0.1% each [2]. As

© Zalyatdinov A.A., Kamenov R.U., Rechenko D.S., 2024

can be seen carbon dioxide CO_2 or carbon dioxide in the total volume of emissions occupies a large part and this is without taking into account the minor categories, that is, the collection, storage and utilization of carbon dioxide is today an urgent task.

Modern technologies allow to effectively capture emissions and retain in any state, but the main task is their utilization and application in various industries, for example, in the manufacture of fire extinguishing agents, refrigerant, soda ash, salts, etc., but this is a very small amount of carbon dioxide processing. Therefore, the development of carbon dioxide utilization technology is an urgent task.

Concrete, as one of the most common materials in the construction industry, has strength, durability and adaptability, which makes it an essential part of modern construction [3–13]. This report takes into account both traditional concrete manufacturing methods and modern technologies, including additives and admixtures that help to improve its properties and enhance the requirements that concrete must meet.

Basic requirements in the manufacture of concrete:

1. The main objective of the concrete manufacturing process is to create a material with optimum strength and durability, capable of withstanding the stresses of service conditions;

2. The process must comply with strict standards and regulations set by the construction industry to ensure safety, reliability and quality of structures;

3. The proportioning of each component must be accurate and in accordance with established proportions to ensure optimum physical and chemical properties of the concrete mix;

4. Concrete must be subjected to certain conditions of temperature and humidity during setting and curing to ensure optimum material properties.

Adherence to the above objectives and requirements in the concrete manufacturing process is a key aspect to create a quality and reliable construction material that can meet the needs of a variety of projects and ensure their durability.

To achieve the above requirements, the concrete manufacturing process begins with carefully selected and proportioned raw materials and supplies. The quality and characteristics of each component will play a crucial role in shaping the final properties of the concrete mixture.

According to GOST 27006-86 "Concretes" selected composition of concrete components including cement, sand, crushed stone and water in the ratio of 1:1,9:3,7:0,5 respectively. This standard allows on the basis of visual control to make changes in the amount of dosed water, so for further work by experimental method was determined the following ratio of concrete mixture components 1:1,9:3,7:1.

Cement production based on the use of CO_2 as one of the components of the formulation is a new and promising technology, not yet implemented on an industrial scale, but has great potential. Carbon dioxide is captured immediately after its release, compressed into a liquid and then transported via pipeline to a storage facility right at the concrete production site [14, 15].

The hardening of concrete when CO_2 is added involves a process called carbonization. This process is a chemical reaction between carbon dioxide (CO_2) and cement hydrates formed during concrete hardening. Carbonization leads to a change in the nanoscale structure of concrete, which ultimately increases its strength and durability.

When CO_2 penetrates the concrete, it reacts with calcium oxide hydrate ($Ca(OH)_2$), which is a byproduct of cement hydration. The result of this reaction is the formation of calcium carbonate ($CaCO_3$):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O. \quad (1)$$

Calcium carbonate is denser and less soluble than calcium oxide hydrate, which contributes to the hardening of the concrete structure.

At the nano level, carbonation leads to changes in the porous structure of concrete. Calcium oxide hydrate occupies more volume and has a looser structure, while calcium carbonate has a denser and more compact crystal lattice. Carbonization fills the pores and micro-cracks in concrete, which reduces its porosity and increases its density.

This process also affects the structure of the cement stone. Due to the formation of calcium carbonate at the nanoscale, the pore volume is reduced, which limits the access of water and other potentially harmful agents inside the concrete. This reduces the rate of degradation of the material and increases its durability.

In addition, the formation of calcium carbonate can facilitate the creation of new microstructural bonds between cement particles. These bonds improve the overall mechanical integrity of the concrete, making it more resistant to mechanical stress and deterioration.

To this day, several countries in the world are actively developing this technology. For example, the Canadian company *CarbonCure Technologies* has developed a technology that allows the production of concrete with CO_2, which is injected in controlled doses into the mixer supplying the stone-forming machine. When CO_2 is added to the concrete during mixing, it interacts with water to form carbonate ions, which rapidly interact with calcium ions released from the cement, resulting in the formation of calcium carbonate (limestone) minerals, forming a nanostructure. The conversion of CO_2 into solid calcium carbonate minerals allows it to bind in the concrete and never be released back into the atmosphere [16–21], with the nanoscale structure yielding an increase in concrete strength. A similar technology has been proposed by

American engineers from *Solidia Technologies*, but for fast-setting concrete [24].

A team of American researchers from Los Angeles is working on a unique solution, which consists in creating a closed-loop process that involves capturing carbon from power plant pipes and using it to create a new building material – carbon dioxide concrete for *3D* printing [22, 23]. Employees of the American *Purdue University* have developed a technology that allows the concrete mixture to absorb CO_2 much stronger due to titanium dioxide, which, when mixed with the concrete solution, reduces the size of calcium hydroxide molecules, which increases the volume of absorbed carbon dioxide.

In the research of scientists from a Japanese university, a process has been developed to produce concrete that affects the environment in several ways at once. The new material is made from old concrete debris that is often discarded, which extends the life of the old materials, and the process takes place at lower temperatures, while the CO_2 with which it is mixed can be obtained either from industrial exhaust or directly from the air [25–27].

Based on the research results of various scientists, it can be concluded that the capture and utilization of CO_2 in concrete production has great potential to reduce greenhouse gas emissions and create environmentally friendly building materials. New technologies, not only reduce the negative impact on the environment, but also improve the quality and durability of concrete. According to some reports, such technologies can reduce CO_2 emissions by up to 30% and increase strength by about 10–19% compared to classical technology. Increased compressive strength also allows producers to optimize their mixes by reducing the amount of cement while maintaining physical and mechanical properties. On average, ready mixed concrete producers can reduce the amount of cement by 5–8%, but the main challenge today is to set up a plant to prepare the mix with CO_2.

The effect of CO_2 application in concrete production, in particular on the change of mixture properties requires research, which is possible only if a special plant for mixing cement, water sand and carbon dioxide in liquid state is created. To date, there are no such installations, so the objectives of this work are the design and manufacture of the installation for obtaining concrete mixing mixture, obtaining concrete mixture of various formulations and research of their physical and mechanical properties.

METHODS AND MATERIALS

In the segment of concrete mixing devices there is no equipment capable of mixing the concrete mixture under pressure, so on the basis of the selected production method the design of concrete mixer according to the scheme (Fig. 1)

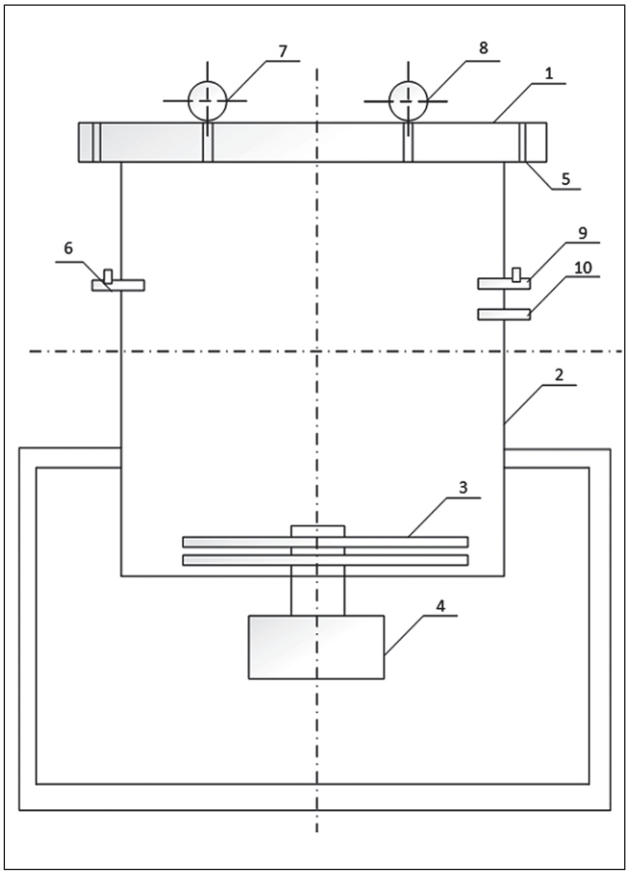

Fig. 1. **Design of concrete mixer for obtaining the mixture under pressure:** 1 – lid attached to the container with pins; 2 – cylinder-shaped container; 3 – paddles (two-level); 4 – motor; 5 – pin holes for connecting the lid and the container through the collar; 6 – tap connecting to the vacuum pump; 7 – vacuum pump; 8 – manometer; 9 – tap for supplying water saturated with CO_2; 10 – plug

The pressurized concrete mixer is a cylinder-shaped steel container with a volume of 25 liters, which is designed to operate at pressures up to 70 atm. Inside there are two-level paddles for mixing the concrete mixture, which are connected to the motor shaft. The tank is mounted on a pivoting base, which will allow this structure to be tilted together with the motor to extract the mixture. The outside of the tank has threaded holes for sensors, taps and plugs.

As a result of the design and development, a pressurized concrete mixing unit was manufactured (Fig. 2). The unit is capable of mixing concrete, in the required volume, which is 30 kg of dry mix.

Two main molds were used to make concrete test specimens for the research:

1. Square molds with sides 100×100×100 mm: These molds are designed to determine the compressive strength of concrete. This size allows the production of specimens

Fig. 2. **Concrete mixer for pressurized mix production**

that meet the test standards and ensure uniformity of results.

2. Rectangular molds with sides 70×70×280 mm: These molds are used to determine the flexural strength of concrete. Their size ensures proper distribution of stresses during testing and allows accurate determination of the strength characteristics of the material.

All molds for the specimens were selected in accordance with the requirements of GOST 10180-2012 [28], which guarantees the accuracy and comparability of the results obtained.

Sample fabrication process

The process of manufacturing the control concrete samples included several steps that ensured the accuracy of component dosing, quality mixing and proper introduction of carbon dioxide. These steps are described below:

1. Equipment preparation and inspection:

All equipment, including the concrete mixer, sample molds, and component measuring tools, was thoroughly checked to ensure that it was clean and working properly before starting. This avoids contamination of the mix and ensures accurate measurements.

2. Calculating the quantity of components:

The quantities of cement, sand, water and carbon dioxide were calculated according to predetermined proportions. This ensures that all specimens are made from the same mix, which is important for comparability of test results.

3. Loading the components into the concrete mixer:

Pre-weighed portions of cement and sand were loaded into the concrete mixer. These components were mixed for a certain time to achieve homogeneity of the dry mix.

4. Addition of calculated amount of water:

After mixing the dry components, the calculated amount of water was added to the concrete mixer. The water was added gradually to avoid lump formation and to ensure uniform distribution of liquid throughout the mix.

5. Mixing:

The mixture of cement, sand and water was mixed in the concrete mixer until a homogeneous mass was obtained. The mixing time was strictly controlled to ensure uniform distribution of all components.

6. Carbon dioxide injection:

After the homogeneity of the mixture was achieved, the calculated amount of carbon dioxide was pumped into the concrete mixer. The injection process was carried out under pressure, allowing the CO_2 to distribute evenly throughout the concrete mass and interact with the mix components.

7. Final Mixing:

After the injection of carbon dioxide, the mixture was again mixed for a certain time. This ensured complete interaction of CO_2 with the concrete components and promoted the formation of nanoscale structure.

8. Pouring the ready-mixed concrete into the molds:

The ready-mixed concrete was poured into the prepared molds. For this purpose, special tools were used to ensure uniform filling of the molds without formation of voids and air pockets.

The obtained specimens were tested on *MATEST E161-03N* (automatic dual-range test press) to measure the compressive and flexural strength of cement stone. Table 1 summarizes the results of the concrete specimens in compression and flexural tests.

It should be noted that mix 6 is a standard mix, i.e. mixing was done in air. Mixes 8, 9, 10 were mixed at different pressures of CO_2, in these mixes with increasing pressure of gas injection the mixture at the output was dry and it was decided to increase the volume of added water by 5% in mixes 11, 12 and 13. In mixes 14, 15, 16 we increased the mixing time to find out whether the mixing time will affect the strength characteristics of concrete, these mixes were also mixed at different pressures of CO_2.

The experimental results are shown in Fig. 3 and 4.

Table 1
Test results of concrete specimens in compression and bending

Batch	Water volume. l	Time. min	CO_2 pressure. atm	Average strength. Ri	
				in compression. σ_{cr}	on bending. σ_{ob}
1	3. 9	5	0	52. 40	1. 65
2	3. 9	5	10	58. 43	1. 74
3	3. 9	5	20	35. 65	1. 03
4	3. 9	5	30	51. 25	1. 18
5	4. 1	5	10	47. 66	1. 52
6	4. 1	5	20	27. 56	1. 00
7	4. 1	5	30	34. 16	1. 03
8	4. 1	10	10	25. 36	0. 86
9	4. 1	10	20	6. 95	0. 16
10	4. 1	10	30	14. 35	0. 45

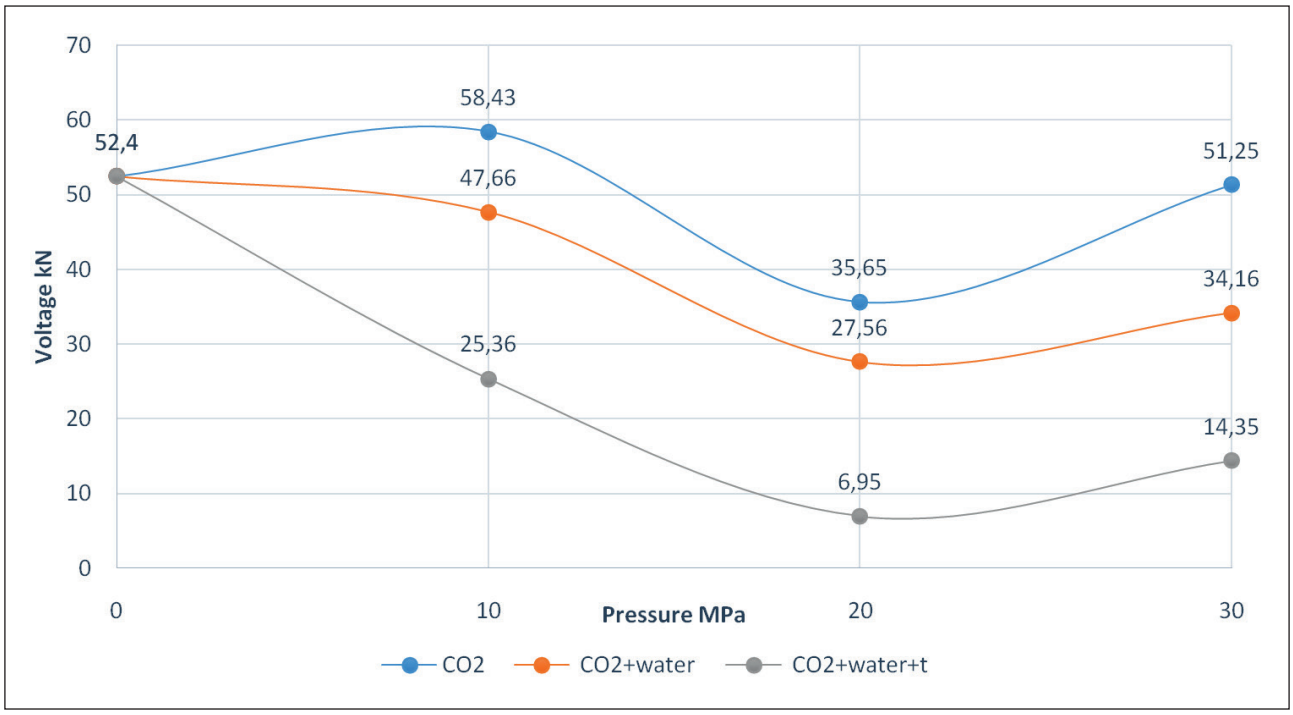

Fig. 3. **Results of compression tests on spicemens**

DISCUSSION

The experimental results showed that CO_2 pressure affects the strength characteristics of concrete mortar. Increasing the pressure up to 10 atmospheres leads to the greatest improvement in strength. However, at pressures of 20 atmospheres and above, the strength characteristics begin to deteriorate. Additionally, it was found that increasing the volume of water added by 5% in mixes 5, 6 and 7 leads to deterioration in strength characteristics. In addition, increasing the mixing time in mixes 8, 9 and 10 also shows a slight decrease in concrete strength. These results suggest that the control of CO_2 pressure, water volume and mixing time are important factors that can affect the strength properties of concrete mortar. Further investigation and optimization of these parameters may lead to a stronger and more stable concrete.

It is important to note that in this study, strength properties were evaluated based on compressive and flexural test results only. For a more complete and accurate analy-

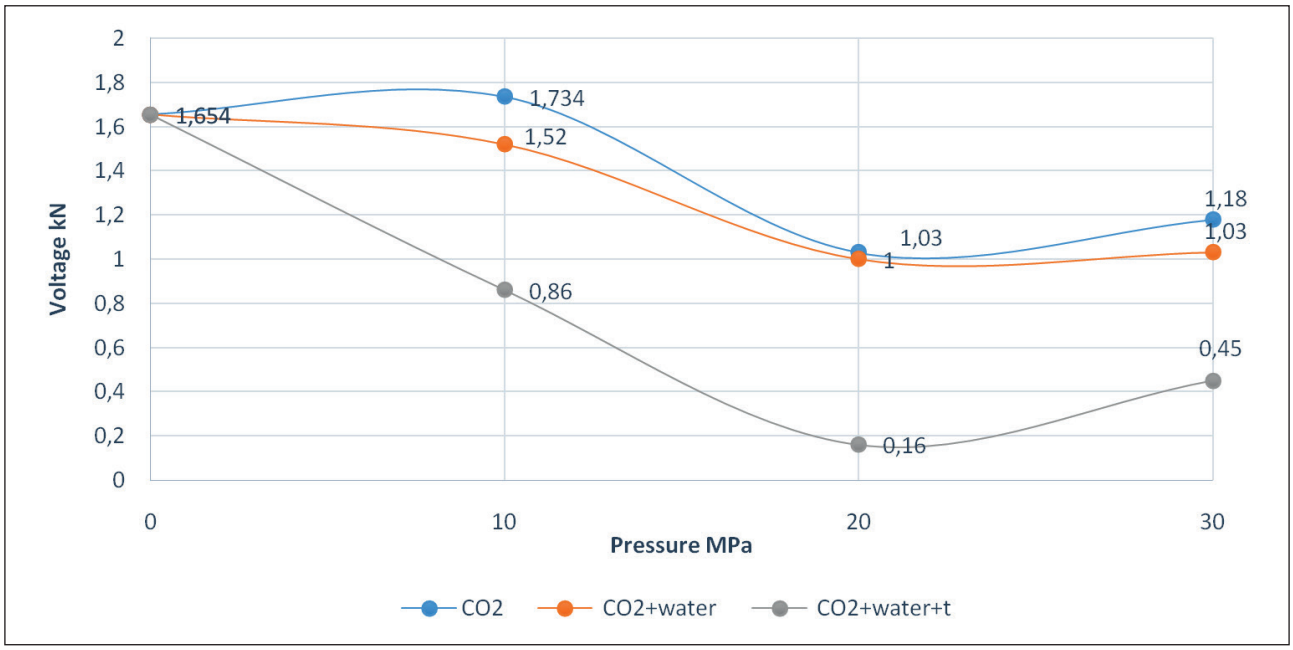

Fig. 4. **Results of bending tests of specimens**

sis, additional studies should be conducted for other types of loads such as tension and delamination, as well as increased pressure, as an increase in strength performance can be seen from Fig. 3 and 4.

In general, the results of this experiment suggest the influence of CO_2 pressure, water volume and mixing time on the strength characteristics of concrete mortar. Further research and optimization of these factors may help to develop more efficient and stronger concrete compositions, thus reducing cement costs for product production.

CONCLUSION

The international community's common goal of reducing greenhouse gas emissions is also contributing to the development of CO_2 capture and storage technologies. The joint action of many countries is aimed at reducing CO_2 emissions by 2050, which makes such innovative approaches in concrete production even more relevant. CO_2 capture and storage in the concrete production process represents a promising and important technology that can reduce the negative environmental impact of this greenhouse gas and achieve more sustainable and eco-friendly construction.

As part of the design and fabrication of the concrete mixer, a structure was developed consisting of a cylinder-shaped container, blades for mixing the concrete mixture, a motor and additional parts. All components were incorporated into drawings that served as the basis for the fabrication of the equipment.

The design and manufacture of concrete is a complex and demanding process that requires adherence to strict requirements, careful monitoring and the use of the right equipment. Optimizing the concrete manufacturing process in accordance with the specified requirements and component calculations results in a quality and reliable product.

During the testing of concrete specimens, the compressive and flexural strength of 110 specimens were measured and evaluated. The results showed that CO_2 pressure and water volume have an influence on the formation of nanoscale structure and strength characteristics of concrete mortar. Increasing the CO_2 pressure up to 10 atmospheres leads to an improvement in strength, but at 20 atmospheres the strength starts to deteriorate. At 30 atmospheres, the strength increases markedly relative to a mix at 20 atmospheres. Increasing the volume of water added by 5% did not show a noticeable increase in strength. Increasing the mixing time also showed no significant improvement in strength.

Concrete carbonization is an effective and modern technology that combines both the current needs and requirements of the concrete industry, allowing to obtain better quality products, saving cement and energy resources, and at the same time combines the utilization of waste from solid fuel combustion, taking a direct part in solving environmental problems of the planet.

The use of CO_2 in concrete production is a promising technology that can not only reduce the carbon footprint of construction materials, but also improve their physical and mechanical properties through the formation of nanoscale structure. Further research and optimization of mixing parameters will make it possible to create stronger and more stable concrete mixtures, which is important for the sustainable development of the construction industry.

REFERENCES

1. Kondratyev V.B. World cement industry. V.B. Kondratyev. Industries and sectors of the global economy: features and trends of development. Foundation for Historical Perspective Center for Research and Analysis. – Moscow : International Relations Publishing House; 2015 185-202.

2. Kline D. Designing a cement plant of the future. Part II. D. Kline. Cement and its applications. 2019; 1: 48-53.

3. Monteiro, P.J.M. Towards sustainable concrete. P.J.M. Monteiro, S.A. Miller, A. Horvath. Nature Mater. 2017;16 (7):698-699.

4. Gartner E.M. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. E.M. Gartner, D.E. Macphee. Cement and Concrete Research. 2011; 41(7): 736-749.

5. Cement technology roadmap [Electronic resource]. Mode of access: https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050. Date of access: 21.01.2024.

6. Evans L. Environmental rating of cement. L. Evans, M. Mutter. Cement and its application. 2019; 4: 24-27.

7. Meyer V. Properties of Solidia Cement and Concrete. V. Meyer, S. Sahu, A. Dunster. Proceedings of the 1st International Conference on Innovation in Lowcarbon Cement & Concrete Technology London, UK; 2019. 24-26.

8. 1st International Conference on Innovation in Low Carbon Cement and Concrete Technology. R. Mangabhai [et al]; 2019. 103

9. Boden T. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions (1751 - 2014) (V. 2017). T. Boden, R. Andres, G. Marland. 2017.

10. Cement and carbon emissions. L. Barcelo [et al.]. Mater Struct. 2014; 47(6); 1055-1065.

11. Andrew R.M. Global CO_2 emissions from cement production. R.M. Andrew. Earth Syst. Sci. Data. 2018;10(1):195-217.

12. Leber I. Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete. I. Leber, F.A. Blakey. Mater. construcc. 2017;7 (079): 39.

13. Shmitko E.I. Chemistry of cement and binding agents. E.I. Shmitko, A.V. Krylov, V.V. Shatalov. Shatalov. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; 2005. 164

14. Scrivener K.L. Options for the future of cement. K.L. Scrivener. 2014; (88)7:11-21.

15. Neville A.M. Properties of concrete. A.M. Neville. M.: Stroyizdat;1972. 269-271.

16. Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. A. Katz. Cement and Concrete Research. 2003;33(5):703-711.

17. Kosmatka S.H. Design and control of concrete mixtures. S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese. – Skokie, Ill: Portland Cement Association 2002. 358.

18. Neville A.M. Concrete technology. A.M. Neville, J.J. Brooks. Harlow: Prentice Hall 2010; 442.

19. Day K.W. Concrete mix design, quality control and specification. K.W. Day. London: E & FN Spon; 1999. 391.

20. Woodson R.D. Concrete structures: protection, repair and rehabilitation. Concrete structures. R.D. Woodson. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann; 2009. 255

21. Handbook of concrete engineering. ред. M. Fintel. New York: Van Nostrand Reinhold; 1985. 892

22. Mehta P.K. Concrete: microstructure, properties, and materials. Concrete. P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – New York: McGraw-Hill Education; 2014. 675.

23. Palley R. Concrete: a seven-thousand-year history. Concrete. R. Palley. New York: The Quantuck Lane Press; 2010. 232.

24. Courland R. Concrete planet: the strange and fascinating story of the world's most common man-made material. Concrete planet. R. Courland. Amherst NY: Prometheus Books; 2011. 396.

25. The new concrete: visual poetry in the 21st century. The new concrete. ред. V. Bean C. McCabe, K. Goldsmith. London: Hayward Publ; 2015. 240.

26. Forty A. Concrete and culture: a material history. Concrete and culture. A. Forty. – London: Reaktion 2012.

27. Collins P. Concrete: the vision of a new architecture. Concrete. P. Collins. – Montréal: McGill-Queen's University Press; 2004. 64.

28. GOST 10180-2012 Concretes. Methods of determination of strength by control samples.

НАЗВАНИЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Albert A. Zalyatdinov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Scientific and Technical Research Center, Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia, zalyatdinovaa@agni-rt.ru, https://orcid.org/0000-0002-8466-9013

Renat U. Kamenov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Department, Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia, renatkamenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9181-5704

Denis S. Rechenko – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia, dsrechenko@agni-rt.ru, https://orcid.org/0000-0002-6776-6452

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Albert A. Zalyatdinov – scientific guidance; final conclusions.

Renat U. Kamenov – conducting the experimental part, final design.

Denis S. Rechenko – research concept; writing the original text.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 12.05.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 07.06.2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья
УДК 69.10.4.7
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256

CC BY 4.0

Исследование влияния CO_2 на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона

Альберт Айратович Залятдинов, Ренат Уахитович Каменов*, Денис Сергеевич Реченко
Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: renatkamenov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях глобальной борьбы с изменением климата актуальным является снижение выбросов CO_2 и его утилизация. Одним из перспективных направлений является использование CO_2 в строительстве, в частности, в производстве бетона. Настоящая статья исследует влияние диоксида углерода на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетонных смесей. **Методы и материалы.** Для исследований была разработана специальная установка для смешивания цемента, песка, воды и CO_2 под давлением. Полученные образцы бетона подвергались испытаниям на прочность при сжатии и изгибе с использованием автоматического двухдиапазонного испытательного пресса MATEST E161-03N. Также проведен анализ микроструктуры образцов с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). **Обсуждение.** Результаты экспериментов показали, что введение CO_2 в бетонную смесь способствует формированию наноразмерной структуры, что улучшает её прочностные характеристики до определенного давления. При дальнейшем увеличении давления наблюдается ухудшение этих характеристик. Дополнительное время перемешивания и увеличение объема воды также влияют на прочность бетона и его микроструктуру. **Заключение.** Использование CO_2 в производстве бетона может значительно снизить углеродный след строительных материалов и улучшить их физико-механические свойства за счет формирования наноразмерной структуры. Дальнейшие исследования и оптимизация параметров смешивания необходимы для создания более прочных и стабильных бетонных смесей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноразмерная структура, утилизация диоксида углерода, прочность бетона, карбонизация, диоксид углерода, экология.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Залятдинов А.А., Каменов Р.У., Реченко Д.С. Исследование влияния CO2 на формирование наноразмерной структуры и физико-механические свойства бетона // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т.16, № 3. С. 249–256. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256. – EDN: DZJPZF.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одним из мировых трендов, направленных на повышение уровня жизни и сохранение планеты, является борьба с изменением климата и его последствиями, что также обусловлено большим вызовом стратегии научно-технологического развития РФ (Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642), связанным с истощением природных ресурсов и ухудшением экологии [1]. Это напрямую связано с углеродной нейтральностью производственной деятельности и компенсацией выбросов предприятий за счет углеродно-отрицательных проектов и технологий. Выбросы предприятия разделяют на три категории: прямые выбросы при производстве; выбросы, полученные из-за потребления энергии (угольная станция, АЭС, ГЭС и т.д.), и выбросы, полученные в течение жизненного цикла товаров (закупка сырья, доставка, хранение, использование, утилизация и т.д.). Две последних категории относятся к косвенным выбросам и требуют серьезной системной проработки учета углеродных единиц. Стоит отметить, что первая категория, к которой относят парниковые газы, самая весомая и компа-

© Залятдинов А.А., Каменов Р.У., Реченко Д.С., 2024

нии-производители нацелены сегодня на уменьшение именно данной категории. При этом 77,9% в структуре выбросов составляет энергетика, 11,8% – промышленность (производство), 5,7% – сельское хозяйство и 4,6% – отходы, а в структуре выбрасываемых газов диоксид углерода (CO_2) составляет 79,2%, метан (CH_4) – 14,5%, оксид диазота (N_2O) – 4,2%, гидрофторуглероды (ГФУ) – 1,9%, перфторуглероды (ПФУ) и гексафторид серы (SF_6) – по 0,1% [2]. Как видно, диоксид углерода CO_2 или углекислота в общем объеме выбросов занимает большую часть и это без учета второстепенных категорий, то есть сбор, хранение и утилизация углекислоты является сегодня актуальной задачей.

Современные технологии позволяют эффективно улавливать выбросы и удерживать в любом состоянии, но главной задачей является их утилизация и применение в различных отраслях, например, в изготовлении средств тушения пожара, хладагента, кальцинированной соды, солей и т.д., однако это очень незначительный объем переработки углекислоты. Поэтому актуальной задачей является разработка технологии утилизации диоксида углерода.

Бетон как один из самых распространенных материалов в строительной индустрии обладает прочностью, долговечностью и адаптируемостью, что делает его неотъемлемой частью современного строительства [3–13]. В данном отчете учтены как традиционные методы изготовления бетона, так и современные технологии, включая добавки и примеси, способствующие улучшению его свойств и улучшению требований, которым бетон должен соответствовать.

Основные требования при изготовлении бетона:

1. Главной целью процесса изготовления бетона является создание материала с оптимальной прочностью и долговечностью, способного выдерживать нагрузки в условиях эксплуатации.

2. Процесс должен соответствовать строгим стандартам и нормативам, установленным в строительной индустрии, чтобы обеспечить безопасность, надежность и качество конструкций.

3. Дозирование каждого компонента должно быть точным и соответствовать установленным пропорциям, чтобы обеспечить оптимальные физические и химические свойства бетонной смеси.

4. Бетон должен находиться под определенными условиями температуры и влажности во время схватывания и затвердевания, чтобы обеспечить оптимальные свойства материала.

Соблюдение указанных целей и требований в процессе изготовления бетона является ключевым аспектом для создания качественного и надежного строительного материала, способного удовлетворить потребности разнообразных проектов и обеспечить их долговечность.

Для достижения вышеуказанных требований процесс изготовления бетона начинается с тщательно подобранного и дозированного сырья и материалов. Качество и характеристики каждого компонента сыграют решающую роль в формировании конечных свойств бетонной смеси.

По ГОСТ 27006-86 «Бетоны» подобран состав компонентов бетона, включающий цемент, песок, щебень и воду в соотношении 1:1,9:3,7:0,5 соответственно. Данный стандарт допускает на основе визуального контроля вносить изменения в количестве от дозированной воды, поэтому для дальнейшей работы экспериментальным методом было определено следующее соотношение компонентов бетонной смеси 1:1,9:3,7:1.

Производство цемента на основе применения CO_2 в качестве одного из компонентов рецептуры является новой и перспективной технологией, пока еще не внедренной в промышленном масштабе, но имеющей большой потенциал. Углекислый газ улавливается сразу после его выброса, сжимается в жидкость и затем транспортируется по трубопроводу в хранилище прямо на месте производства бетона [14, 15].

Упрочнение бетона при добавлении CO_2 связано с процессом, называемым карбонизацией. Этот процесс представляет собой химическую реакцию между диоксидом углерода (CO_2) и гидратами цемента, образующимися при затвердевании бетона. Карбонизация приводит к изменению наноразмерной структуры бетона, что в конечном итоге повышает его прочность и долговечность.

Когда CO_2 проникает в бетон, он реагирует с гидратом оксида кальция ($Ca(OH)_2$), который является побочным продуктом гидратации цемента. Результатом этой реакции является образование карбоната кальция ($CaCO_3$):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O. \quad (1)$$

Карбонат кальция является более плотным и менее растворимым, чем гидрат оксида кальция, что способствует упрочнению структуры бетона.

На наноуровне карбонизация приводит к изменениям в пористой структуре бетона. Гидрат оксида кальция занимает больше объема и имеет более рыхлую структуру, в то время как карбонат кальция обладает более плотной и компактной кристаллической решеткой. При карбонизации происходит заполнение пор и микротрещин в бетоне, что уменьшает его пористость и повышает плотность.

Этот процесс также оказывает влияние на структуру цементного камня. Вследствие образования карбоната кальция на наноуровне уменьшается объем пор, что ограничивает доступ воды и других потенциально вредных агентов внутрь бетона. Это умень-

шает скорость деградации материала и повышает его долговечность.

Кроме того, образование карбоната кальция может способствовать созданию новых микроструктурных связей между частицами цемента. Эти связи улучшают общую механическую целостность бетона, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

На сегодняшний день несколько стран в мире активно развивают эту технологию. Так, например, канадская компания *CarbonCure Technologies* разработала технологию, позволяющую выпускать бетон с CO_2, который вводится контролируемыми дозами в смеситель, снабжающий камнеформовочную машину. Когда CO_2 добавляется к бетону во время смешивания, он взаимодействует с водой, образовывая ионы карбоната, который быстро взаимодействует с ионами кальция, высвобождаемыми из цемента, что приводит к образованию минералов карбоната кальция (известняка), формируя наноструктуру. Конверсия CO_2 в твердые минералы карбоната кальция позволяет ему связываться в бетоне и никогда не высвобождаться обратно в атмосферу [16–21], при этом наноразмерная структура дает повышение прочности бетона. Подобную технологию предложили американские инженеры из *Solidia Technologies*, но для быстросхватывающихся бетонов [24].

Команда американских исследователей из Лос-Анджелеса работает над уникальным решением, заключающимся в создании замкнутого процесса, включающего захват углерода на трубах электростанций и его использование при создании нового строительного материала – углекислобетона для 3*D*-печати [22, 23]. Сотрудники американского *Purdue University* разработали технологию, позволяющую бетонной смеси значительно сильнее поглощать CO_2 за счет диоксид титана, который при смешивании с раствором бетона уменьшает размер молекул гидроксида кальция, что увеличивает объем поглощаемого углекислого газа.

При исследованиях ученых из японского университета разработан процесс получения бетона, который воздействует на окружающую среду сразу несколькими способами. Новый материал производится из старых бетонных обломков, которые часто выбрасываются, что продлевает срок службы старых материалов, а процесс протекает при более низких температурах, при этом CO_2, с которым он смешивается, может быть получен как из промышленных выхлопов, так и прямо из воздуха [25–27].

По результатам исследований различных ученых можно сделать вывод о том, что улавливание и использование CO_2 в производстве бетона имеет большой потенциал для сокращения выбросов парниковых газов и создания экологически чистых строительных материалов. Новые технологии позволяют не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить качество и прочность бетона. По некоторым данным, подобные технологии позволяют уменьшить выбросы CO_2 до 30% и повысить прочность примерно на 10–19% по сравнению с классической технологией. Повышение прочности на сжатие также позволяет производителям оптимизировать их смеси уменьшением количества цемента при сохранении физико-механических свойств. В среднем, производители готового смешанного бетона могут уменьшить количество цемента на 5–8%, но главной проблемой сегодня является создание установки для подготовки смеси с CO_2.

Влияние применения CO_2 в производстве бетона, в частности, на изменение свойств смеси, требует исследований, которые возможны только при создании специальной установки для смешивания цемента, песка, воды и углекислого газа в жидком состоянии. На сегодняшний день не существует подобных установок, поэтому задачами данной работы являются проектирование и изготовление установки для получения бетоннoперемешивающей смеси, получение бетонной смеси различных рецептур и исследование их физико-механических свойств.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В сегменте бетоноперемешивающих устройств не существует оборудования, способного перемешивать бетонную смесь под давлением, поэтому на основе выбранного метода производства разработана конструкция бетономешалки по схеме (рис. 1).

Бетономешалка для получения смеси под давлением представляет собой емкость из стали в виде цилиндра объемом 25 л, которая рассчитана для работы под давлением до 70 атм. Внутри установлены двухуровневые лопасти для перемешивания бетонной смеси, которые соединены с валом двигателя. Емкость установлена на поворотном основании, что при эксплуатации позволит наклонять данную конструкцию вместе с двигателем для извлечения смеси. Снаружи емкости имеются отверстия с резьбой для датчиков, кранов и заглушки.

В результате проектирования и разработки изготовлено бетоноперемешивающее устройство, работающее под давлением (рис. 2). Установка способна проводить замесы бетона в необходимом объеме, который составляет 30 кг сухой смеси.

Для проведения исследований использовались две основные формы для изготовления контрольных образцов бетона:

1. Квадратные формы со сторонами 100×100×100 мм: Эти формы предназначены для определения прочности бетона при сжатии. Данный размер

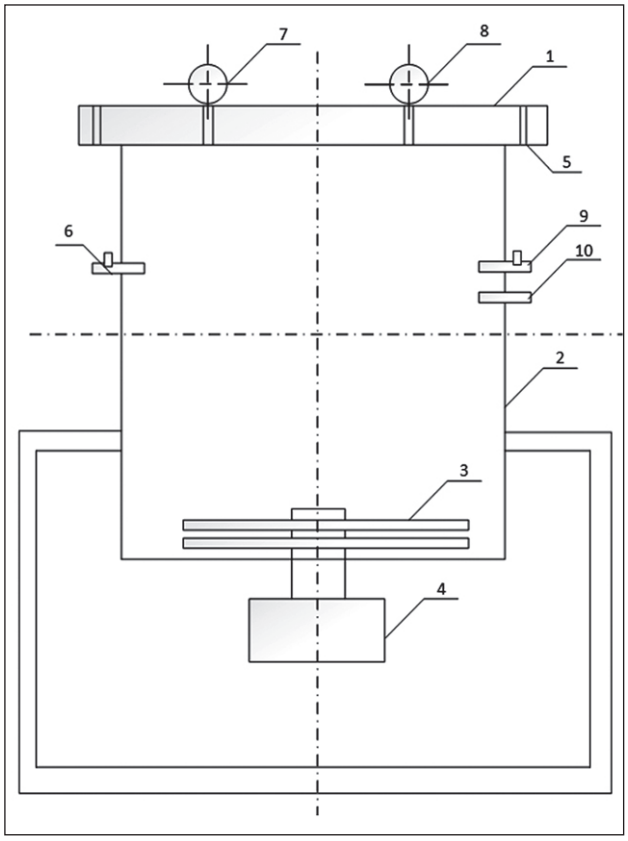

Рис. 1. **Конструкция бетономешалки для получения смеси под давлением: 1 –** крышка, прикрепляющаяся к емкости с помощью штифтов; 2 – емкость в форме цилиндра; 3 – лопасти (двухуровневые); 4 – двигатель; 5 – отверстия под штифты для соединения крышки и емкости через манжету; 6 – кран, соединяющий с вакуум-насосом; 7 – вакуум-насос; 8 – манометр; 9 – кран для подачи воды, насыщенной CO_2; 10 – заглушка

Рис. 2. **Бетономешалка для получения смеси под давлением**

позволяет получать образцы, соответствующие стандартам испытаний и обеспечивающие однородность результатов.

2. Прямоугольные формы со сторонами 70×70×280 мм. Эти формы используются для определения прочности бетона при изгибе. Их размер обеспечивает правильное распределение напряжений во время испытаний и позволяет точно определить прочностные характеристики материала.

Все формы для образцов были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [28], что гарантирует точность и сопоставимость полученных результатов.

Процесс изготовления образцов

Процесс изготовления контрольных образцов бетона включал несколько этапов, которые обеспечивали точность дозирования компонентов, качественное смешивание и правильное введение диоксида углерода. Эти этапы описаны ниже:

1. Подготовка и проверка оборудования

Перед началом работы все оборудование, включая бетономешалку, формы для образцов и инструменты для измерения компонентов, было тщательно проверено на предмет чистоты и работоспособности. Это позволяет избежать загрязнения смеси и обеспечивает точность измерений.

2. Расчет количества компонентов

Количество цемента, песка, воды и диоксида углерода рассчитывалось в соответствии с заранее установленными пропорциями. Это гарантирует, что все образцы будут изготовлены из одной и той же смеси, что важно для сопоставимости результатов испытаний.

3. Загрузка компонентов в бетономешалку

В бетономешалку загружались предварительно взвешенные порции цемента и песка. Эти компоненты перемешивались в течение определенного времени для достижения однородности сухой смеси.

4. Добавление расчетного количества воды

После перемешивания сухих компонентов в бетономешалку добавлялось расчетное количество воды.

Вода добавлялась постепенно, чтобы избежать образования комков и обеспечить равномерное распределение жидкости по всей смеси.

5. Смешивание

Смесь цемента, песка и воды перемешивалась в бетономешалке до получения однородной массы. Время смешивания строго контролировалось, чтобы гарантировать равномерное распределение всех компонентов.

6. Закачка углекислого газа

После достижения однородности смеси в бетономешалку закачивалось расчетное количество диоксида углерода. Процесс закачки проводился под давлением, что позволяло CO_2 равномерно распределяться по всей массе бетона и взаимодействовать с компонентами смеси.

7. Окончательное смешивание

После закачки диоксида углерода смесь снова перемешивалась в течение определенного времени. Это обеспечивало полное взаимодействие CO_2 с компонентами бетона и способствовало формированию наноразмерной структуры.

8. Заливка готового бетона в формы

Готовая бетонная смесь заливалась в подготовленные формы. Для этого использовались специальные инструменты, обеспечивающие равномерное заполнение форм без образования пустот и воздушных карманов.

Испытание полученных образцов проводилось на установке *MATEST E*161-03*N* (автоматический двухдиапазонный испытательный пресс) для измерения прочности цементного камня на сжатие и изгиб. В табл. 1 приведены результаты испытаний бетонных образцов при сжатии и изгибе.

Следует отметить, что 6 замес является стандартным, т.е. перемешивание производилось в воздушной среде. Замесы 8, 9, 10 перемешивались при разных давлениях CO_2, в данных замесах при увеличении давления закачки газа смесь на выходе получалась сухой и было принято решение в замесах 11, 12 и 13 увеличить объем добавляемой воды на 5%. В замесах 14, 15, 16 увеличили время перемешивания, чтобы узнать, повлияет ли время перемешивания на прочностные характеристики бетона, данные замесы также перемешивались при разных давлениях CO_2.

Результаты эксперимента приведены на рис. 3 и 4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента показали, что давление CO_2 влияет на прочностные характеристики бетонного раствора. Увеличение давления до 10 атмосфер приводит к наибольшему улучшению прочности. Однако при давлении 20 атмосфер и выше прочностные характеристики начинают ухудшаться. Дополнительно выявлено, что увеличение объема добавляемой воды на 5% в замесах 5, 6 и 7 приводит к ухудшению прочностных характеристик. Кроме того, увеличение времени перемешивания в замесах 8, 9 и 10 также демонстрирует некоторое уменьшение прочности бетона. Эти результаты позволяют сделать вывод, что контроль давления CO_2, объема воды и времени перемешивания являются важными факторами, которые могут влиять на прочностные свойства бетонного раствора. Дальнейшее исследование и оптимизация этих параметров могут привести к созданию более прочного и стабильного бетона.

Таблица 1

Результаты испытания бетонных образцов при сжатии и изгибе

Замес	Объем воды, л	Время, мин	Давление CO_2, атм	Средняя прочность, кН	
				на сжатие, $\sigma_{сж}$	на изгиб, $\sigma_{изг}$
1	3,9	5	0	52,40	1,65
2	3,9	5	10	58,43	1,74
3	3,9	5	20	35,65	1,03
4	3,9	5	30	51,25	1,18
5	4,1	5	10	47,66	1,52
6	4,1	5	20	27,56	1,00
7	4,1	5	30	34,16	1,03
8	4,1	10	10	25,36	0,86
9	4,1	10	20	6,95	0,16
10	4,1	10	30	14,35	0,45

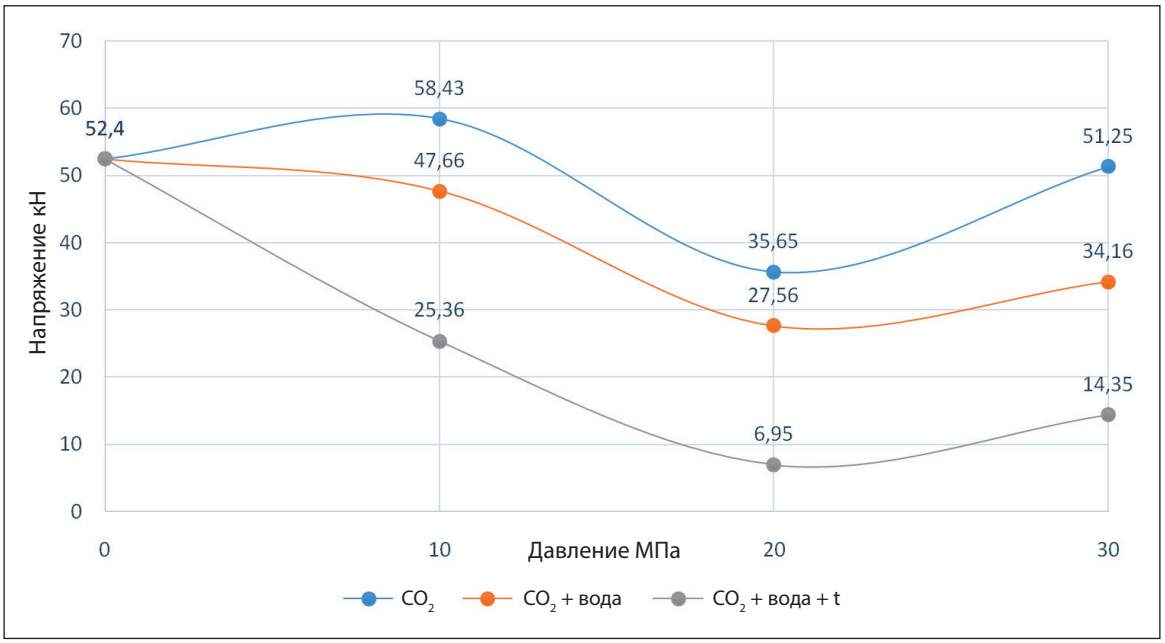

Рис. 3. **Результаты испытаний образов на сжатие**

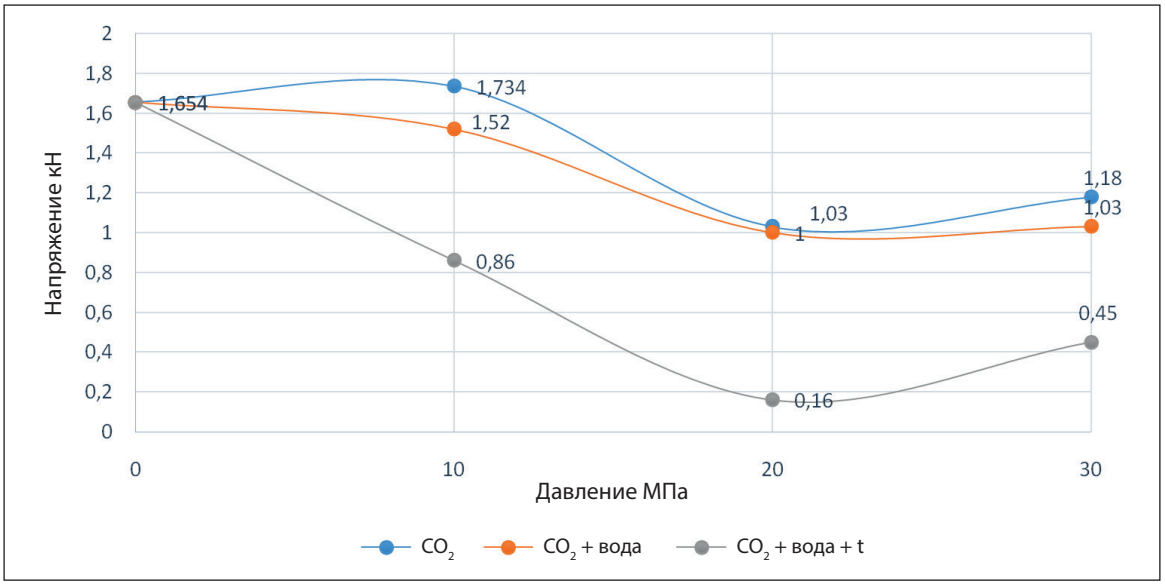

Рис. 4. **Результаты испытаний образов на изгиб**

Важно отметить, что в данном исследовании прочностные характеристики оценивались только на основе результатов испытания на сжатие и изгиб. Для более полного и точного анализа следует дополнительно провести исследования на другие виды нагрузок, такие как растяжение и расслоение, а также увеличить давление, так как по рис. 3 и 4 виден рост прочностных характеристик.

В целом, результаты данного эксперимента позволяют сделать вывод о влиянии давления CO_2, объема воды и времени перемешивания на прочностные характеристики бетонного раствора. Дальнейшие исследования и оптимизация этих факторов могут помочь разработать более эффективные и прочные композиции бетона, что позволит снизить расходы цемента на производство изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая цель международного сообщества по сокращению выбросов парниковых газов также способствует развитию технологий улавливания и хране-

ния CO_2. Совместные действия множества стран направлены на сокращение выбросов CO_2 к 2050 году, что делает такие инновационные подходы в производстве бетона еще более актуальными. Улавливание и хранение CO_2 в процессе производства бетона представляют собой перспективную и важную технологию, способную снизить негативное воздействие этого парникового газа на окружающую среду и достичь более устойчивого и экобезопасного строительства.

В рамках разработки и изготовления бетономешалки была разработана конструкция, состоящая из емкости в форме цилиндра, лопастей для перемешивания бетонной смеси, двигателя и дополнительных деталей. Все компоненты были включены в чертежи, которые служили основой для изготовления оборудования.

Разработка и изготовление бетона является сложным и ответственным процессом, который требует соблюдения строгих требований, тщательного контроля и использования правильного оборудования. Оптимизация процесса изготовления бетона в соответствии с заданными требованиями и расчетами компонентов позволяет получить качественный и надежный продукт.

В ходе испытаний бетонных образцов проведено измерение и оценка прочности 110 образцов при сжатии и изгибе. Результаты показали, что давление CO_2 и объем воды имеют влияние на формирование наноразмерной структуры и прочностные характеристики бетонного раствора. Увеличение давления CO_2 до 10 атмосфер приводит к улучшению прочности, но при давлении 20 атмосфер прочность начинает ухудшаться. При давлении 30 атмосфер прочность заметно увеличивается относительно замеса, проводимого при давлении 20 атмосфер. Увеличение объема добавляемой воды на 5% не показали заметного роста прочности. Увеличение времени перемешивания также не показало существенного улучшения прочности.

Карбонизация бетона – эффективная и современная технология, сочетающая в себе текущие нужды и требования бетонной промышленности, позволяющая получать более качественные изделия, экономию цемента и энергетических ресурсов и в то же время совмещающая в себе утилизацию отходов от сжигания твердого топлива, принимающая прямое участие в решении экологических проблем планеты.

Использование CO_2 в производстве бетона представляет собой перспективную технологию, способную не только снизить углеродный след строительных материалов, но и улучшить их физико-механические свойства за счет формирования наноразмерной структуры. Дальнейшие исследования и оптимизация параметров смешивания позволят создать более прочные и стабильные бетонные смеси, что важно для устойчивого развития строительной индустрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кондратьев В.Б. Мировая цементная промышленность / В.Б. Кондратьев // Отрасли и сектора глобальной экономики: особенности и тенденции развития / Фонд исторической перспективы Центр исследований и аналитики. Москва : Издательство «Международные отношения», 2015. С. 185–202.

2. Клайн Д. Проектирование цементного завода будущего. Часть II / Д. Клайн // Цемент и его применение. 2019. № 1. С. 48–53.

3. Monteiro, P.J.M. Towards sustainable concrete. P.J.M. Monteiro, S.A. Miller, A. Horvath. Nature Mater. 2017;16 (7):698-699.

4. Gartner E.M. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. E.M. Gartner, D.E. Macphee. Cement and Concrete Research. 2011; 41(7): 736-749.

5. Cement technology roadmap [Electronic resource]. Mode of access: https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050. Date of access: 21.01.2024.

6. Эванс Л. Экологический рейтинг цемента / Л. Эванс, М. Муттер // Цемент и его применение. 2019. № 4. С. 24–27.

7. Meyer V. Properties of Solidia Cement and Concrete. V. Meyer, S. Sahu, A. Dunster. Proceedings of the 1st International Conference on Innovation in Lowcarbon Cement & Concrete Technology London, UK; 2019. 24-26.

8. 1st International Conference on Innovation in Low Carbon Cement and Concrete Technology. R. Mangabhai [et al]; 2019. 103

9. Boden T. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions (1751 - 2014) (V. 2017). T. Boden, R. Andres, G. Marland. 2017.

10. Cement and carbon emissions. L. Barcelo [et al.]. Mater Struct. 2014; 47(6); 1055-1065.
11. Andrew R.M. Global CO_2 emissions from cement production. R.M. Andrew. Earth Syst. Sci. Data. 2018;10(1):195-217.
12. Leber I. Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete. I. Leber, F.A. Blakey. Mater. construcc. 2017;7 (079): 39.
13. Шмитько Е.И. Химия цемента и вяжущих веществ / Е.И. Шмитько, А.В. Крылов, В.В. Шаталов. Воронеж: Воронеж.гос.арх.-строит.ун-т, 2005. 164 с.
14. Scrivener K.L. Options for the future of cement. K.L. Scrivener. 2014; (88)7:11-21.
15. Невилль А.М. Свойства бетона / А.М. Невилль // М.: Стройиздат, 1972. С. 269-271.
16. Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. A. Katz. Cement and Concrete Research. 2003;33(5):703-711.
17. Kosmatka S.H. Design and control of concrete mixtures. S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese. – Skokie, Ill: Portland Cement Association 2002. 358.
18. Neville A.M. Concrete technology. A.M. Neville, J.J. Brooks. Harlow: Prentice Hall 2010; 442.
19. Day K.W. Concrete mix design, quality control and specification. K.W. Day. London: E & FN Spon; 1999. 391.
20. Woodson R.D. Concrete structures: protection, repair and rehabilitation. Concrete structures. R.D. Woodson. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann; 2009. 255
21. Handbook of concrete engineering. ред. M. Fintel. New York: Van Nostrand Reinhold; 1985. 892
22. Mehta P.K. Concrete: microstructure, properties, and materials. Concrete. P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – New York: McGraw-Hill Education; 2014. 675.
23. Palley R. Concrete: a seven-thousand-year history. Concrete. R. Palley. New York: The Quantuck Lane Press; 2010. 232.
24. Courland R. Concrete planet: the strange and fascinating story of the world's most common man-made material. Concrete planet. R. Courland. Amherst NY: Prometheus Books; 2011. 396.
25. The new concrete: visual poetry in the 21st century. The new concrete. ред. V. Bean C. McCabe, K. Goldsmith. London: Hayward Publ; 2015. 240.
26. Forty A. Concrete and culture: a material history. Concrete and culture. A. Forty. – London: Reaktion 2012.
27. Collins P. Concrete: the vision of a new architecture. Concrete. P. Collins. – Montréal: McGill-Queen's University Press; 2004. 64.
28. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Залятдинов Альберт Айратович – кандидат технических наук, начальник центра научно-технических исследований, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, zalyatdinovaa@agni-rt.ru, https://orcid.org/0000-0002-8466-9013

Каменов Ренат Уахитович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, renatkamenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9181-5704

Реченко Денис Сергеевич – доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия, dsrechenko@agni-rt.ru, https://orcid.org/0000-0002-6776-6452

ВКЛАД АВТОРОВ

Залятдинов А.А. – научное руководство; итоговые выводы.

Каменов Р.У. – проведение экспериментальной части.

Реченко Д.С. – концепция исследования; написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.05.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 07.06.2024.

Review article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-257-266

CC BY 4.0

Management analytics: a bibliometric analysis

Y. Lu[1]*, Leonid A. Ivanov[2], Fengyi Wang[1], Zhanna V. Pisarenko[3], Chen-gang Ye[4]

[1] Beijing Technology and Business University, Beijing, China
[2] Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia
[3] Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
[4] University of International Business and Economics, Beijing, China

* Corresponding author: e-mail: ziiyuu@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. As nanotechnology continues to evolve and its industrial applications expand, the need for effective data management, analysis, and dissemination is becoming more urgent. Management analytics has emerged as a critical new interdisciplinary field in current business environments, enabling organizations to leverage data-driven insights for informed decision-making and strategic planning. **Methods and materials.** This study reviews and analyzes research in the interdisciplinary field of management analytics for the period from 2021 to 2023. To conduct bibliometric analysis, data from various sources were used, including academic publications, monographs, reviews, reports, etc. Through a systematic review of the relevant literature, this study aims to provide insight into key topics, methodologies and outcomes in the field of management analytics, as well as to identify directions for future research directions. Results: according to the results of the analysis, it was found that the main source of articles in this area is the Journal of Management Analytics. The total number of publications on this topic for the period amounted to 83 units, the total number of citations for a certain time period has been increasing. The leading countries in terms of the number of citations of academic articles on the topic under study are the United States, India and China. **Discussion.** So far, the interdisciplinary field of management analytics has not been widely discussed in academic circles. However, leading countries in the world in terms of the number of academic articles and citations are at the forefront of this emerging field. This should be taken into account especially in the development of the nanosystems and nanomaterials industry, which is one of the priority areas for the development of science and technology, where management analytics technologies will be in demand and can provide competitive advantages to companies. **Conclusion.** The importance of the new interdisciplinary field of management analytics will continue to grow. In the course of the study, it was found that this emerging field has been increasing its popularity and it could be an effective tool for organizations in the nearest fu-ture.

KEYWORDS: management analytics, interdisciplinary field, bibliometric analysis, nanotechnologies.

FOR CITATION:
Lu Y., Ivanov L.A., Wang F., Pisarenko Zh.V., Ye C. Management Analytics: A Bibliometric Analysis. *Nanotechnologies in Construction.* 2024; 16(3): 257–266. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-257-266. – EDN: GWTOFD.

INTRODUCTION

In the rapidly evolving landscape of modern business, the integration of data-driven methodologies with strategic management practices has become increasingly vital (1, 2). This fusion has given rise to the field of management analytics, which harnesses the power of data analytics, statistical modeling, and business intelligence to inform managerial decision-making and drive organizational success (3, 4). The processes of convergence, that is, the convergence of previously unrelated sciences, are becoming increasingly important in our time, achievements in certain fields are based on advanced research in other fields and are applicable to them. This is especially important for implementation and use in making management decisions in industries where innovative areas are used, such as nanotechnology.

As businesses generate vast amounts of data across various processes and functions, the need for advanced analytical methods to extract actionable insights has never been more pressing (5, 6, 7, 8). Management analytics offers a systematic approach to analyze and interpret this data, enabling organizations to optimize their operations, enhance performance, and gain a competitive edge in

© Lu Y., Ivanov L.A., Wang F., Pisarenko Zh.V., Ye C., 2024

today's dynamic market environment (9). For countries with transitive economies, Management analytics plays a special role, as it allows you to process a lot of data with greater speed and accuracy and make the right management decisions, which ultimately increases the competitiveness of domestic companies.

The field of management analytics encompasses a diverse array of approaches, including descriptive analytics, which focuses on summarizing historical data to identify patterns and trends; predictive analytics, which leverages statistical techniques and machine learning algorithms to forecast future outcomes (10, 11, 12,13); and prescriptive analytics, which provides recommendations for decision-making based on optimization and simulation models. By leveraging these analytical tools and techniques, organizations can gain valuable insights into their business processes, customer behavior, market trends, and competitive landscape, enabling them to make informed decisions and drive business growth (14, 15, 16, 17).

Despite the growing importance of management analytics, there remains a need for comprehensive literature analysis to understand the current state of research, identify emerging trends, and uncover gaps in existing knowledge. This bibliographic analysis aims to address these needs by synthesizing and analyzing the existing literature on management analytics. By systematically reviewing the relevant literature, this study seeks to provide insights into the key themes, methodologies, and findings in the field of management analytics, as well as to offer recommendations for future research directions. Through this analysis, we aim to contribute to the ongoing dialogue and advancement of knowledge in the field of management analytics.

The structure of the paper is as follows. Section 2 depicted the current status of management analytics. Section 3 introduced the method used. Section 4 illustrates the descriptive analyses. Section 5 explores the network analyses. Section 6 offers the discussions. Section 7 is the conclusion.

THE CURRENT STATUS OF MANAGEMENT ANALYTICS

The current status of management analytics reflects a dynamic landscape shaped by the increasing adoption of data-driven decision-making across various industries and sectors. Organizations are leveraging advanced analytics tools and techniques to extract actionable insights from vast and diverse datasets, with the aim of enhancing operational efficiency, driving innovation, and gaining a competitive edge in the market (18, 19, 20).

One prominent trend in the current status of management analytics is the proliferation of big data and analytics technologies. With the exponential growth of data generated by digital technologies, organizations are investing heavily in data infrastructure, analytics platforms, and talent to harness the potential of big data for strategic decision-making (21, 22). This includes the adoption of cloud-based analytics solutions, machine learning algorithms, and artificial intelligence (AI) capabilities to analyze and interpret large volumes of structured and unstructured data (23, 24, 25).

Another key aspect of the current status of management analytics is the integration of analytics into core business functions and processes. Analytics is no longer confined to specialized departments or roles but is increasingly embedded into day-to-day operations across all levels of the organization. This integration enables real time monitoring, predictive modeling, and prescriptive recommendations to drive informed decision making and strategic planning (26, 27). Such integration is particularly important for organizations implementing innovative nanotechnologies in a variety of industries. For example, in medicine, nanotechnology and management analytics technologies, which use large data sets, can combine to create therapies that can be precisely tailored to the individual needs of patients. Decision-making is based on better and more accurate patient data through the development of low-cost, passive, intelligent sensor devices based on nanotechnology (28).

Moreover, the current status of management analytics underscores the importance of data governance, privacy, and ethics. As organizations collect and analyze sensitive data, there is a growing emphasis on ensuring data security, compliance with regulations such as General Data Protection Regulation (GDPR), and ethical use of data (29, 30). This includes implementing robust data governance frameworks, establishing clear data privacy policies, and fostering a culture of responsible data stewardship within the organization (31, 32).

Overall, the current status of management analytics is characterized by rapid advancements in technology, evolving organizational practices, and an increasing recognition of the transformative potential of data-driven decision-making. As organizations continue to embrace analytics as a strategic imperative, the field of management analytics is poised for further growth and innovation in the years to come.

METHODOLOGY

Bibliometrics is a discipline that utilizes mathematical and statistical methods to quantitatively analyze detailed information from books and other communication media. Techniques, such as bibliographic coupling, co-citation analysis, co-authorship networks, and keyword co-occurrence analysis, were used to examine the selected papers (33, 34, 35). The data for the preparation of this review article were obtained from open sources.

DESCRIPTIVE ANALYSIS

Main Information About Data

Table 1 presents descriptive statistics pertaining to the selected search records for subsequent analysis. In the field of management science spanning the years 2021 to 2023, a total of 83 articles were published in the Journal of Management Analytics. The mean citations per document stand at 2.07. These publications are classified into three types: 74 'articles', 1 'article; early access,' and 8 'reviews'. Combined, these publications feature 374 Author's Keywords. Additionally, they involve 220 unique authors, of whom only 8 have contributed single-authored articles, totaling 36 such documents. On average, each publication involves 2.65 authors or 3.04 co-authors, with a Collaboration Index of 2.86, indicative of the significance of collaborative research within management analytics.

Year-wise publication trend

Figure 1 illustrates that 2021 marked the peak year for published articles, totaling 32 articles. Subsequently, over the ensuing two years, the number of published articles declined, with 5 articles in 2022 and 26 articles in 2023.

Most Relevant Sources

To find relevant publications on management analytics, we examined the peer-reviewed scholarly Journal of Management Analytics, which covers a range of topics related to analytics, decision-making, and management.

Table 1
Main Information About Data

Description	Results
Main information about data	
Timespan	2021:2023
Sources (Journals, Books, etc.)	1
Documents	83
Average years from publication	2.07
Document types	
article	74
article; early access	1
review	8
Document contents	
Author's Keywords (DE)	374
Authors	
Authors	220
Author Appearances	252
Authors of single-authored documents	8
Authors of multi-authored documents	212
Authors collaboration	
Single-authored documents	9
Authors per Document	2.65
Co-Authors per Documents	3.04
Collaboration Index	2.86

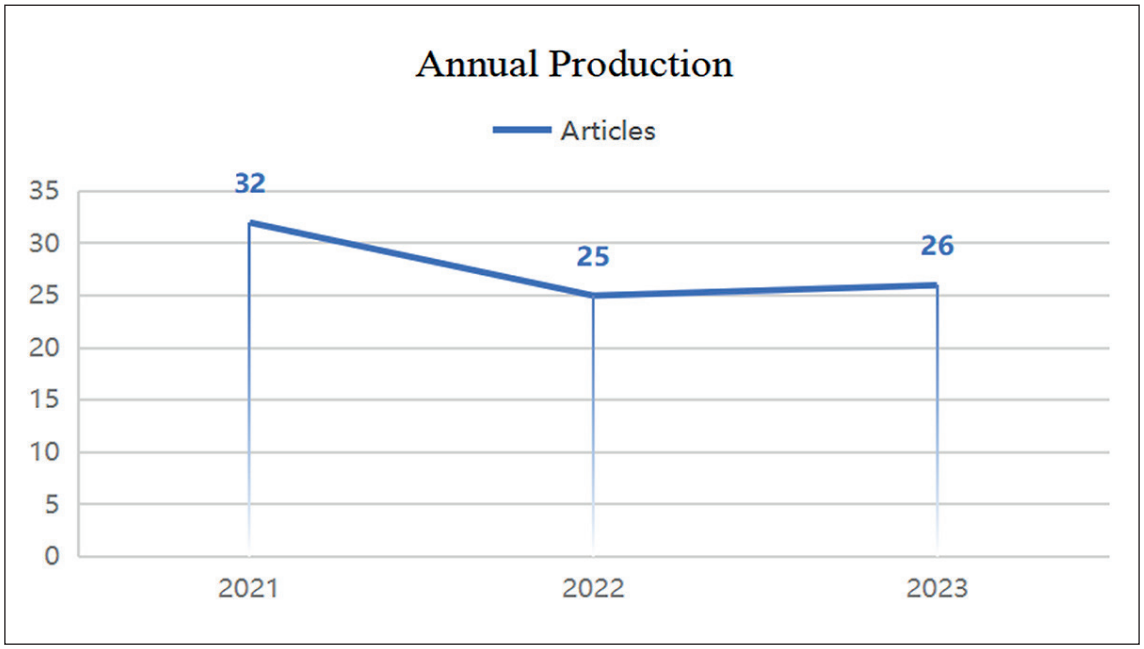

Fig. 1. **Annual Production of the Articles, 2021–2023**

Journal of Management Analytics has become the most prominent publication in the field of management analytics with 83 articles. Therefore, we used these 83 articles as research samples (Table 2).

Table 2
Most Relevant Sources

Sources	Articles
JOURNAL OF MANAGEMENT ANALYTICS	83

Most frequent words

The most frequently used words and expressions in academic articles on a specific topic show the key concepts, themes, and terminology that are central to that field of research. Analyzing the word frequencies can provide insights into: Fundamental theories and models, emerging trends and hot topics, etc. (36)

Figure 2 displays the word cloud derived from 83 articles, whereas Table 3 lists the most commonly encountered terms within the compiled articles. Through both visual and tabular representations, it becomes evident that "inventory" emerges as the most frequently cited term, followed by other prominent terms such as "machine learning," "deep learning," "genetic algorithm," "supply chain," and others.

Then, after identifying the most common words and expressions, we ranked them by the frequency of their appearance in the studied array of articles.

The next step is to determine from which countries the research of scientists has the largest number of citations.

Table 3
Most Frequent Words

Words	Occurrences
Inventory	9
Machine learning	6
Deep learning	4
Genetic algorithm	4
Supply chain	4
Data envelopment analysis	3
Decision making	3
Deterioration	3
Game theory	3
Rework	3
Supply chain management	3

Fig. 2. **Word Cloud from Relevant Articles**

Most cited countries

Table 4 presents the top 10 countries representative of their citation performance, showcasing both their total citation counts and average article citation counts. While the United States leads in total citations, it ranks third in average article citation. INDIA secures the second position in total citations but lags in average article citation, standing at eighth. China holds the third position in total citations, with these three nations holding a substantial lead over others. Moreover, BRAZIL boasts the highest average number of article citations, despite ranking fifth in total citations. These countries have significantly contributed to the field of management analytics, with additional noteworthy contributors including IRAN, PHILIPPINES, SRI LANKA, among others.

Table 4
Countries: most cited articles

Country	Total Citations	Average Article Citations
USA	258	14.33
INDIA	158	5.85
CHINA	97	4.85
IRAN	47	11.75
BRAZIL	24	24.00
PHILIPPINES	17	8.50
SRI LANKA	15	15.00
MALAYSIA	11	11.00
SWEDEN	10	10.00
CANADA	4	2.00

NETWORK ANALYSIS

Conceptual Structures

Figure 3 depicts the co-word analysis network comprising 8 keywords, organized into 4 clusters. The initial cluster encompasses 2 key terms, namely "inventory" and "deterioration." Following suit, the second cluster features 2 keywords, "supply chain" and "game theory." The third cluster comprises 2 keywords: "ensemble learning" and "feature selection." Lastly, the

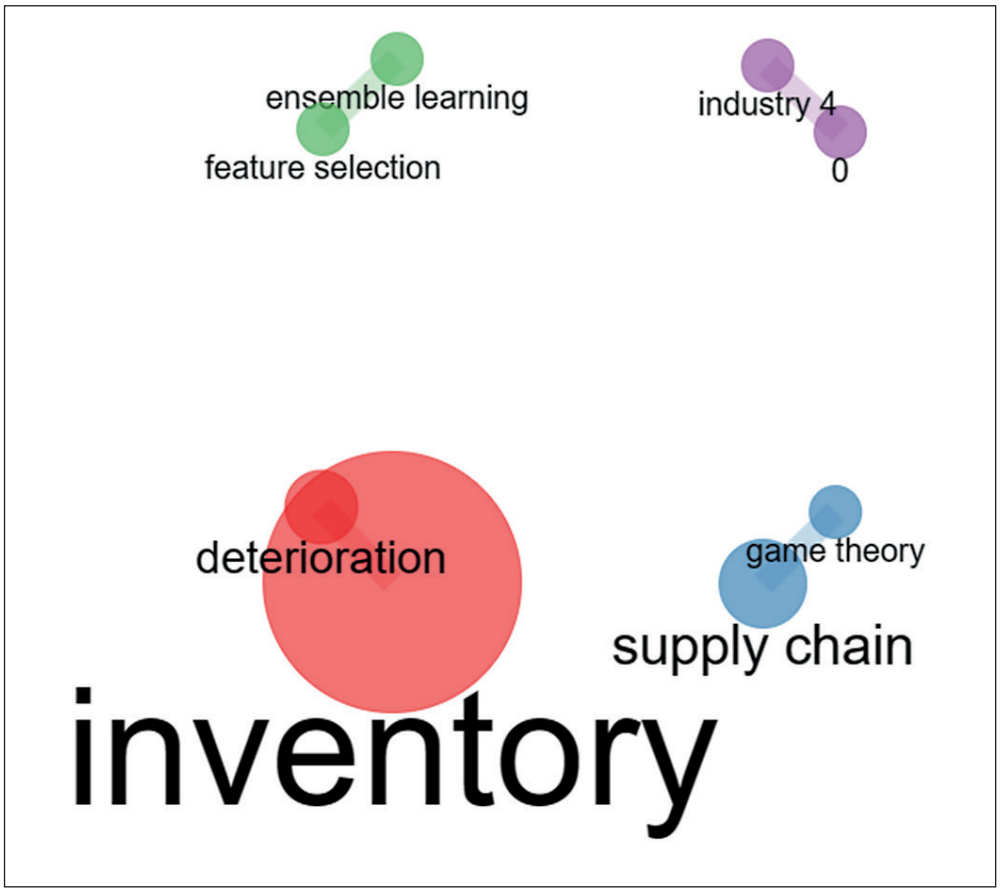

Fig. 3. **Keyword: Co-occurrence Network**

fourth cluster incorporates 2 keywords: "industry 4" and "0." These primary keywords shed light on prominent research themes and con-tent in recent years, while also emphasizing the interconnectedness of these topics within the domain of management science and its affiliated areas.

Figures 4 present thematic maps derived from authors' keywords and indexed keywords. These thematic networks are instrumental in revealing inherent linkages within a subject, uncovering latent patterns, and pinpointing pivotal concepts or components, thereby enhancing comprehension of the composition and framework of a particular theme. In Figure 4, a thematic network is depicted, showcasing the interconnections among review articles concerning management science, with these themes categorized into 10 clusters. From the visualization, it's apparent that subjects like inventory, deep learning, decision-making, and genetic algorithms are focal points within the domain of management science.

Collaboration Structures

Figure 5 displays the collaborative bond among nations. Based on this collaboration, these countries are primarily segmented into four groups. China exhibits the highest central value within this network, succeeded by Australia, Denmark, and the United States.

DISCUSSION

Applications and Use Cases

One of the central themes in discussions about management analytics is the myriad of applications across different industries and organizational functions. Participants often share examples of how analytics is being used to optimize business processes, improve decision-making, enhance customer experiences, and drive innovation. Case studies and real-world examples are frequently cited to illustrate the practical impact of analytics in various contexts (37, 38, 39). Convergence of nanotechnology and data driven analytics is the case (40, 41).

Technology and Tools

Discussions about management analytics also delve into the latest technologies and tools shaping the field (42). Participants may explore emerging trends such as artificial intelligence, machine learning, predictive analytics, and big data platforms. They may discuss the benefits

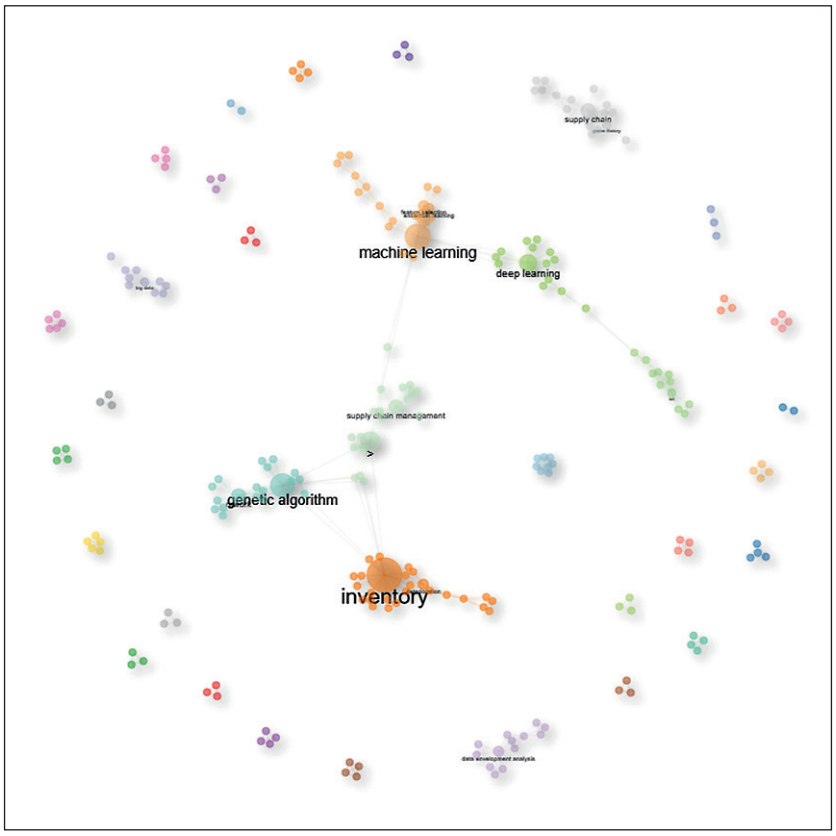

Fig. 4. **Thematic Network**

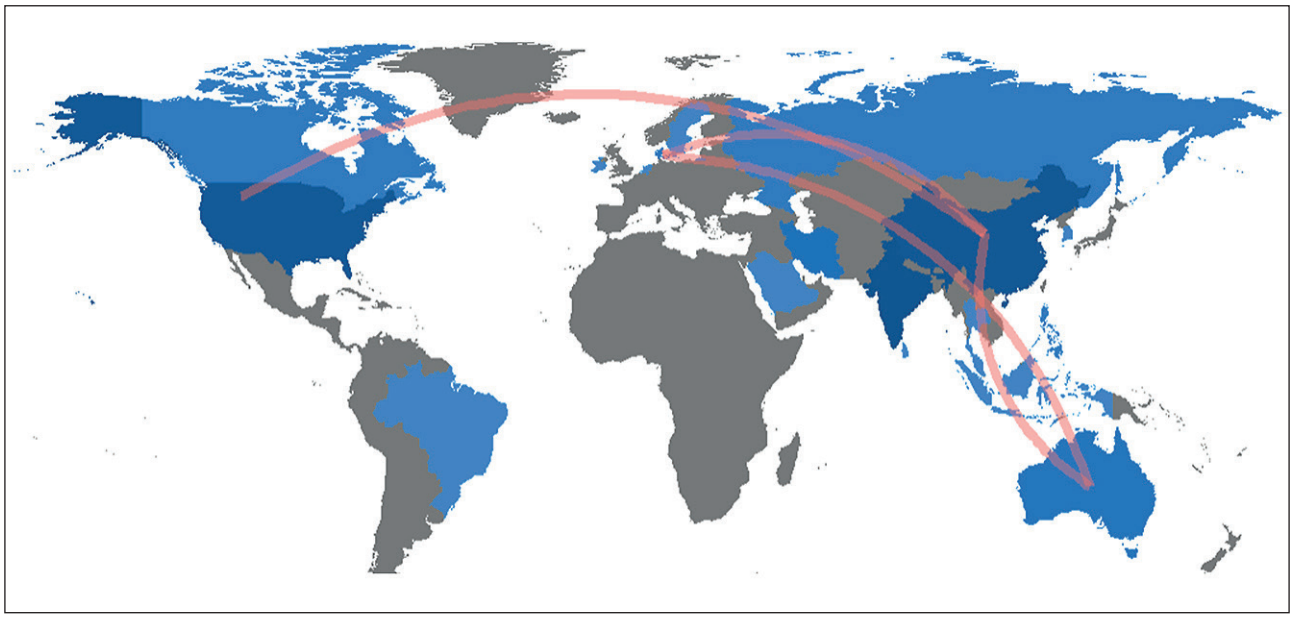

Fig. 5. **Country Collaboration Map**

and limitations of different analytics tools, as well as considerations for selecting the most appropriate technology stack for specific use cases (43, 44).

Data Governance and Ethics

Another important topic in discussions about management analytics is data governance, privacy, and ethics. Participants often examine the ethical implications of data collection, storage, and analysis, particularly in relation to issues such as data privacy, consent, and bias (45, 46).

It is crucial that management analytics tools for nanotechnology requires special knowledge and skills, taking into account the specifics of know-how, trade secrets, etc. Experts in this field need not only a deep understanding of the technical aspects of nanotechnology, but also the ability to effectively work with big data and apply modern methods of modeling and analysis. They also need ethical skills when dealing with information. Therefore, it is necessary to pay attention to the lack of publications on training personnel in management analytics, especially in the field of information security at innovative enterprises (47).

CONCLUSION

In conclusion, management analytics represents a powerful toolset for organizations seeking to harness the potential of data-driven decision-making. Through the integration of advanced technologies, such as artificial intelligence, machine learning, and big data analytics, management analytics enables organizations to gain valuable insights, optimize operations, and drive innovation. However, while the benefits of management analytics are clear, realizing its full potential requires overcoming various challenges. As organizations continue to embrace management analytics, it is essential to prioritize investments in data infrastructure, talent development, and cultural transformation. By fostering a data-driven culture and investing in the right technology stack, organizations can unlock new opportunities for growth, efficiency, and competitiveness. Moreover, as the field of management analytics evolves, it is crucial to stay abreast of emerging trends and best practices, and to continuously reassess and refine analytics strategies to meet evolving business needs.

REFERENCES

1. 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/10.15828/2075-8545-2021-13-1-23-31

2. 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

3. 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

4. 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.

5. 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

6. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. Journal of Industrial Information Integration. 2023; 23:100511. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511

7. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A. Quantum information technology. Journal of Industrial Information Integration. 2022; 1;28:100365. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100365

8. Ivanov L.A., Xu L.D., Razumeev K.E., Pisarenko Zh.V., Demenev A.V. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part VI. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(6): 370–378. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-6-370-378

9. Chawla P., Gao J.Z., Gao T., Luo C., Li H., We Y. An interactive web-based solar energy prediction system using machine learning techniques. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 308-335.

10. Saragih H.S. Predicting song popularity based on Spotify's audio features: insights from the Indonesian streaming users. Journal of Management Analytics. 2023; (10:4): 693-709.

11. Gurusinghe R.N., Arachchige B.J.H., Dayarathna D. Predictive HR analytics and talent management: a conceptual framework. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 195-221.

12. Wang X., Zhi J. A machine learning-based analytical framework for employee turnover prediction. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 351-370.

13. Hosseini S. A decision support system based on machined learned Bayesian network for predicting successful direct sales marketing. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 295-315.

14. Liu Q., Yu M., Xiong B., Cai Z., Zhang P., Tan C. Health analytics in business research: a literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 447-476.

15. Fu L., Li Ling, Li Lusi, Zhang W., Luo Z. Impact of hospital size on healthcare information system effectiveness: evidence from healthcare data analytics. Journal of Management Analytics. 2021; (9:2): 211-231.

16. Wang H., Zhang M., Ying H., Zhao X. The impact of blockchain technology on consumer behavior: a multimethod study. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 371-390.

17. Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Muminova S.R., Miloradova N.G. Inventions in the area of nanotechnologiesand 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. Zhou S., Zhan Y. A new method for performance evaluation of decision-making units with application to service industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 84-100.

19. Yin S., Zhang N., Xu J. Information fusion for future COVID-19 prevention: continuous mechanism of big data intelligent innovation for the emergency management of a public epidemic outbreak. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 391-423.

20. Norinder U., Norinder P. Predicting Amazon customer reviews with deep confidence using deep learning and conformal prediction. Journal of Management Analytics. 2022; (9:1): 1-16.

21. Iaksch J., Fernandes E., Borsato M. Digitalization and Big data in smart farming – a review. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 333-349.

22. Ableeva A., Salimova G., Lubova T., Farrahetdinova A., Siraeva R. Evaluation of the efficiency of fixed assets of economic sectors based on index analysis. Journal of Management Analytics. 2022; (9:3): 369-382.

23. Li X., Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Li L. Artificial intelligence applications in finance: a survey. Journal of Management Analytics. 2023; 2;10(4):676-92. https://doi.org/10.1080/23270012.2023.2244503

24. Chen H., Li L., Chen Y. Explore success factors that impact artificial intelligence adoption on telecom industry in China. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 36-68.

25. Garg D., Alam M. Smart agriculture: a literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 359-415.

26. Bradbury J.D., Guadagno R.E. Enhanced data narratives. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 171-194.

27. Mohammadi S.S., Azar A., Ghatari A.R., Alimohammadlou M. A model for selecting green suppliers through intervalvalued intuitionistic fuzzy multi criteria decision making models. Journal of Management Analytics. 2022; (9:1): 60-85.

28. Shitharth S., Meshram P., Kshirsagar P.R., Manoharan H., Tirth V., Sundramurthy V.P. Impact of Big Data Analysis on Nanosensors for Applied Sciences Using Neural Networks. Journal of Nanomaterials. 2021; ID 4927607. https://doi.org/10.1155/2021/4927607

29. Xie S., Gan C. Classification of territory risk by generalized linear and generalized linear mixed models. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 223-246.

30. Pan S., Ye Q., Shi W. Using a novel ensemble learning framework to detect financial reporting misconduct. Journal of Management Analytics. 2023; (10:4): 607-624.

31. Mahato C., Mahata G.C. Decaying items inventory models with partial linked-to-order upstream trade credit and downstream full trade credit. Journal of Management Analytics. 2021; (9:1): 137-168.

32. Charoontham K., Worakantak J., Kanchanapoom K., Tancho N. A countermeasure designed to restrain self-serving behavior and strategic rating disclosure of credit rating agencies. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 550-565.

33. Naveen, Donthu, Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of business research. 2021; (133): 285-296.

34. Magaly, Marin, Merigo J.M., Popa S. Twenty years of the Journal of Knowledge Management: A bibliometric analysis. Journal of Knowledge Management. 2018; (22:8): 1655-1687.

35. Talafidaryani, Mojtaba, Jalali S. M. J., Moro S. Tracing the evolution of digitalisation research in business and management fields: Bibliometric analysis, topic modelling and deep learning trend forecasting. Journal of Information Science. 2023; 01655515221148365.

36. Pournia Y. A Study on the Most Frequent Academic Words in High Impact Factor English Nursing Journals: A Corpus-based Study. Iran J Nurs Midwifery Res. 2019;24(1):11-17. doi: 10.4103/ijnmr.IJNMR_190_17. PMID: 30622572; PMCID: PMC6298166.

37. Rahiminia M., Shahrabifarahani S., Mojaradi Z., Aghsami A., Jolai F. A queueing-inventory model to control the congestion of patients and medical waste in the medical centers, a case study. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 416-445.

38. Ocampo L.A., Vasnani N.N., Chua F.L.S., Pacio L.B.M., Galli B.J. A bi-level optimization for a make-to-order manufacturing supply chain planning: a case in the steel industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:4): 598-621.

39. Solomon S., Ellegood W. A., Pannirselvam G., Riley J. A decision support model for supplier portfolio selection in the retail industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 486-501.

40. Gopukumar S. T. Nano Informatics: The Bridge between Nanotechnology and Data Science. Nanonamed and Nanotechnol 2024, 9(1): 000281. 10.23880/nnoa-16000281.

41. Gurjar R.S., Kumar S. Innovative Practices in Nanotechnology through Artificial Intelligence. Nanomedicine and Nanotechnology. 2024; 9(2). https://doi.org/10.23880/nnoa-16000310

42. Thomann, Eva, Maggetti M. Designing research with qualitative comparative analysis (QCA): Approaches, challenges, and tools. Sociological Methods & Research. 2020; (49:2): 356-386.

43. Sharbini H, Sallehuddin R., Haron H. Crowd evacuation simulation model with soft computing optimization techniques: a systematic literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (8:3): 443-485.

44. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A. Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond. Information Systems Frontiers. 2022. https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w

45. Kim J. H. 6G and Internet of Things: a survey. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 316-332.

46. Chen W., He W., Shen J., Tian X., Wang X. Systematic analysis of artificial intelligence in the era of industry 4.0. Journal of Management Analytics. 2023; (10:1): 89-108.

47. Ionescu A.M. Nanotechnology and Global Security. Connections QJ. 2016; 15(2):31-47. https://doi.org/10.11610/Connections.15.2.03

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Leonid A. Ivanov – PhD, 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

Fengyi Wang – Graduate Student at Beijing Technology and Business University, her research interests consist of emerging technologies and application, business analytics, etc., 1299171963@qq.com

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

Chengang Ye – Professor, 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 02.05.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПЕЦИАЛИСТОВ И УЧЕНЫХ

Обзорная статья
УДК 65
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-257-266

CC BY 4.0

Управленческая аналитика: библиометрический анализ

Ян Лу[1]*, Леонид Алексеевич Иванов[2], Фэньи Ван[1], Жанна Викторовна Писаренко[3], Чэнган Йе[4]

[1] Пекинский университет технологий и бизнеса, Пекин, Китай
[2] Российская инженерная академия, Москва, Россия
[3] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[4] Университет международного бизнеса и экономики, Пекин, Китай

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

АННОТАЦИЯ

Введение. По мере дальнейшего развития нанотехнологий и расширения спектра их применений в промышленности потребность в эффективном управлении данными, их анализе и распространении становится все более актуальной. Управленческая аналитика выступает новым развивающимся междисциплинарным направлением, которое позволяет компаниям использовать данные для принятия обоснованных решений и стратегического планирования. **Методы и материалы.** В данном исследо-вании проведен обзор и анализ исследований в междисциплинарной области Management Analytics (Аналитика менеджмента) за период с 2021 по 2023 гг. Для проведения библиометрического анализа использовались данные из различных источников, включая научные публикации из периодических изданий, монографии, обзоры, отчеты и пр. Путем систематического обзора соответствующей литературы данное исследование направлено на то, чтобы дать представление о ключевых темах, методологиях и результатах в области управленческой аналитики, а также выявить направления для будущих направлений исследований. Результаты: по результатам проведенного анализа установлено, что основным источником статьей по данному направлению является Журнал управленческой аналитики (The Journal of Management Analytics). Общее количество публикаций по указанной теме за период составило 83 единицы, общее количество цитирований на определенном временном промежутке увеличивалось. Ведущими странами по количеству цитирований научных публикаций по исследуемой тематике являются США, Индия и Китай. **Дискуссия.** Пока междисциплинарное направление «Управленческая аналитика» не так часто рассматривается в научных кругах. Однако ведущие страны по общему количеству научных публикаций и цитированию в мире лидируют и в данном новом направлении. Это следует учитывать особенно при развитии индустрии наносистем и наноматериалов, являющейся одним из приоритетных направлений развития науки и технологий, где технологии управленческой аналитики будут востребованы и могут обеспечивать конкурентные преимущества компаниям. **Выводы.** Значимость нового междисциплинарного направления управленческой аналитики будет продолжать расти в будущем. В ходе исследования было установлено, что управленческая аналитика становится все более востребованным направлением и эффективным инструментом для организаций. Ее значение заключается в том, что она обеспечивает компаниям возможность принимать обоснованные решения на основе больших данных и предполагает практическое применение в различных сферах бизнеса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управленческая аналитика, междисциплинарная область, библиометрический анализ, нанотехнологии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Лу Я., Иванов Л.А., Ван Ф., Писаренко Ж.В., Йе Ч. Управленческая аналитика: библиометрический анализ // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 257–266. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-257-266. – EDN: GWTOFD.

ВВЕДЕНИЕ

В быстро меняющемся ландшафте современного бизнеса интеграция методологий, основанных на данных, с практиками стратегического управления приобретает первостепенное значение (1, 2). Эти процессы привели к возникновению новой области – управленческой аналитики, где используются возможности анализа данных, статистического моделирования и бизнес-аналитики для принятия обо-

© Лу Я., Иванов Л.А., Ван Ф., Писаренко Ж.В., Йе Ч., 2024

снованных управленческих решений и вносят вклад в успех организации (3, 4). Процессы конвергенции, то есть сближения ранее отдельных не связанных наук приобретают в наше время все большее значение, достижения в отдельных областях основаны на передовых исследованиях в отдельных областях и применимы к ним. Особенно это важно для внедрения и использования при принятии управленческих решений на производствах, где используются инновационные направления, такие, как нанотехнологии.

По мере того как компании генерируют огромные объемы данных по различным процессам и функциям, потребность в передовых аналитических методах для извлечения полезной информации становится как никогда актуальной (5, 6, 7, 8). В данном контексте методы управленческой аналитики предлагают систематический подход к анализу и интерпретации этих данных, позволяя организациям оптимизировать свои операции, повысить производительность и получить конкурентное преимущество в современной динамичной рыночной среде (9). Для стран с транзитивными экономиками управленческая аналитика играет особенную роль, так как позволяет с большей скоростью и точностью обрабатывать множество данных и принимать правильные управленческие решения, что увеличивает в конечном итоге конкурентоспособность национальных компаний.

Область управленческой аналитики охватывает широкий спектр подходов, включая описательную аналитику, которая фокусируется на обобщении исторических данных для выявления закономерностей и тенденций; предиктивную аналитику, в которой используются статистические методы и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования будущих результатов (10, 11, 12, 13), и предписывающую аналитику, на базе которой предоставляются рекомендации по принятию решений на основе оптимизационных и имитационных моделей. Используя эти аналитические инструменты и методы, организации могут получить ценную информацию о своих бизнес-процессах, поведении клиентов, рыночных тенденциях и конкурентной среде, что позволяет им принимать обоснованные решения и стимулировать рост бизнеса (14, 15, 16, 17).

Несмотря на растущее значение нового междисциплинарного направления управленческой аналитики, сохраняется потребность во всестороннем анализе литературы для понимания текущего состояния исследований, выявления новых тенденций и выявления пробелов в существующих знаниях. Данный библиографический анализ направлен на удовлетворение этих потребностей путем синтеза и анализа существующей литературы по управленческой аналитике. На основе систематического обзора соответствующей литературы данная работа направлена на то, чтобы дать представление о ключевых темах, методологиях и результатах научных исследований в области управленческой аналитики, а также предложить рекомендации по будущим направлениям и возможным тематикам научных исследований. Посредством анализа имеющихся научных публикаций авторы постарались внести свой вклад в постоянный диалог и продвижение знаний в области управленческой аналитики.

Структура работы выглядит следующим образом. В разделе 2 описывается текущее состояние исследований по направлению «управленческая аналитика». В третьем разделе представлена используемая методология. В разделе 4 проведен описательный библиографический анализ. Раздел 5 посвящен сетевому анализу публикационной активности. В шестом разделе авторы представили обсуждение полученных результатов. Раздел 7 – заключение.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ АНАЛИТИКИ

Текущий интерес к тематике управленческой аналитики отражает динамичный ландшафт, сформированный растущим внедрением принятия решений в различных отраслях и секторах экономики на основе больших данных. Организации используют передовые аналитические инструменты и методы для извлечения полезной информации из обширных и разнообразных наборов данных с целью повышения операционной эффективности, стимулирования инноваций и получения конкурентного преимущества на рынке (18, 19, 20).

Это одна из самых заметных тенденций в развитии направления управленческой аналитики – широкое распространение технологий больших данных и аналитики. В связи с экспоненциальным ростом данных, генерируемых цифровыми технологиями, организации вкладывают значительные средства в инфраструктуру данных, аналитические платформы и поиск талантов, чтобы иметь возможности использовать потенциал больших данных для принятия стратегических решений (21, 22), что включает в себя, прежде всего, внедрение облачных аналитических решений, алгоритмов машинного обучения и возможностей искусственного интеллекта (ИИ) для анализа и интерпретации больших объемов структурированных и неструктурированных данных (23, 24, 25).

Еще одним ключевым аспектом растущего интереса к тематике управленческой аналитики является интеграция аналитики в основные бизнес-функции и процессы в компаниях разных отраслей. Аналитика больше не ограничивается применением в специализированных отделах или отдельных бизнес-процессах, а все чаще внедряется в рутинные операции

на всех уровнях организации. Такая интеграция позволяет осуществлять мониторинг работы организации в режиме реального времени, прогнозное моделирование и предписывающие рекомендации для принятия обоснованных решений и стратегического планирования (26, 27). В современных условиях интеграция особенно важна для организаций, внедряющих инновационные нанотехнологии в различных отраслях промышленности. Например, в медицине нанотехнологии и технологии управленческой аналитики, использующие большие массивы данных, могут использоваться совместно для создания методов лечения заболеваний, которые могут быть точечно адаптированы к индивидуальным потребностям пациентов. Принятие решений в таком случае будет основываться на базе более совершенных точных данных о пациентах благодаря разработке недорогих пассивных интеллектуальных сенсорных устройств на основе нанотехнологий (28).

Более того, пристальное внимание к теме управленческой аналитики и связанных с этим возможностей подчеркивает важность контроля управления данными, вопросов конфиденциальности и цифровой этики. По мере того как организации собирают и анализируют конфиденциальные данные, все большее внимание уделяется обеспечению безопасности данных, соблюдению таких нормативных актов, как, например, «Общий регламент по защите данных» (GDPR), или этичному использованию данных (29, 30). Это включает в себя внедрение надежных структур управления данными, установление четких политик конфиденциальности данных и развитие культуры ответственного управления данными в организации (31, 32).

В целом, текущее внимание к тематике управленческой аналитики обусловлено быстрым развитием технологий, развитием современных организационных практик и растущим признанием трансформационного потенциала принятия решений на основе данных. По мере того как организации продолжают использовать аналитику в качестве стратегического императива, область управленческой аналитики в ближайшей перспективе будет все более востребована в научном сообществе и в бизнесе.

МЕТОДОЛОГИЯ

Библиометрия – это дисциплина, в которой используются математические и статистические методы для количественного анализа и детализации информации из книг, бумажных и электронных изданий и других средств коммуникации. Для изучения отобранных публикаций в данном исследовании были использованы такие методы, как установление библиографической связи (анализ цитируемости для установления отношения сходства между документами), анализ совместного цитирования, формирование сетей соавторства (коллаборация) и анализ совместного появления ключевых слов (33, 34, 35). Данные для подготовки данной обзорной статьи были получены из открытых источников.

ОПИСАТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Основная информация о данных

В табл. 1 представлена описательная статистика, относящаяся к выбранным записям по поиску для последующего библиометрического анализа.

Таблица 1
Обобщенная информация о данных

Описание	Результат
Общая информация	
Временной интервал	2021–2023
Источники (журналы, книги и т.д.)	1
Документы	83
Среднее количество лет с момента публикации	2.07
Типы документов	
Статья	74
Статья с ранним доступом	1
Обзорная статья	8
Содержание документа	
Авторские ключевые слова	374
Авторы	
Количество уникальных авторов (без повторений)	220
Общее количество авторов	252
Количество авторов в статьях без соавторов	8
Количество авторов в статьях с соавторами	212
Сотрудничество (коллаборация) авторов	
Количество документов с одним автором	8
Количество авторов на один документ	2.65
Количество соавторов на один документ	3.04
Индекс совместной работы (коллаборационый индекс)	2.86

В предметной области менеджмента за период с 2021 по 2023 год в научном журнале «Аналитика менеджмента» (Journal of Management Analytics) было опубликовано в общей сложности 83 статьи. Среднее количество цитирований на один документ за этот период составило 2,07. Найденные публикации можно разделить условно на три основных типа: 74 публикации относятся к определению «статья», одна публикация – ознакомительная версия статьи или «статья с ранним доступом» и 8 публикаций – «обзорные статьи». В общей совокупности эти публикации содержат итого 374 авторских ключевых слова. Кроме того, в выбранном массиве статей участвуют 220 уникальных авторов, из которых только 8 авторов являются единственными авторами статей, то есть не имеют соавторов в опубликованных статьях, при этом всего документов с единственным автором в нашей выборке оказалось 36. В среднем в каждой публикации участвуют 2,65 автора или 3,04 соавтора, а индекс коллаборации равен 2,86, что свидетельствует о значимости совместных исследований в области управленческой аналитики.

Тенденция распределения публикаций по годам

На рис. 1 показано, что 2021 год стал пиковым годом по публикационной активности исследуемой совокупности статей, всего было опубликовано 32 статьи. В дальнейшем, в течение последующих двух лет количество опубликованных по данной тематике статей сокращалось: 5 статей было опубликовано в 2022 году и 26 статей в 2023 году.

Наиболее релевантные источники

Чтобы найти релевантные публикации по управленческой аналитике, мы изучили рецензируемый научный журнал Journal of Management Analytics, который охватывает ряд тем, связанных с аналитикой, принятием решений и управлением. Журнал «Управленческая аналитика» является на сегодняшний день самым известным и уважаемым изданием в области управленческой аналитики. В данном журнале мы выявили за исследуемый период итого 83 статьи. Поэтому мы использовали эти 83 статьи в качестве исследовательской выборки (табл. 2).

Таблица 2
Наиболее релевантные источники

Источник	Количество статей
JOURNAL OF MANAGEMENT ANALYTICS	83

Наиболее часто встречающиеся слова и выражения

Наиболее часто используемые слова и выражения в научных статьях по определенной теме показывают ключевые концепции, темы и терминологию, которые являются центральными для этой области исследований. Анализ частотности слов и выражений может дать представление о фундаментальных

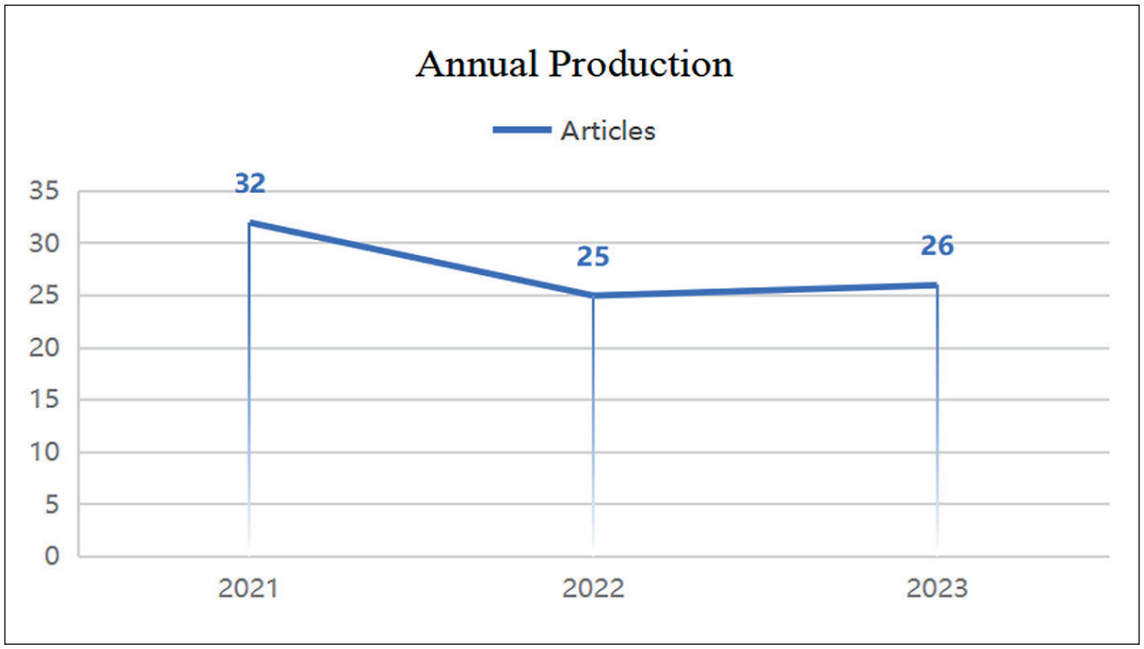

Рис. 1. **Динамика количества опубликованных статей, ед. 2021–2023 гг.**

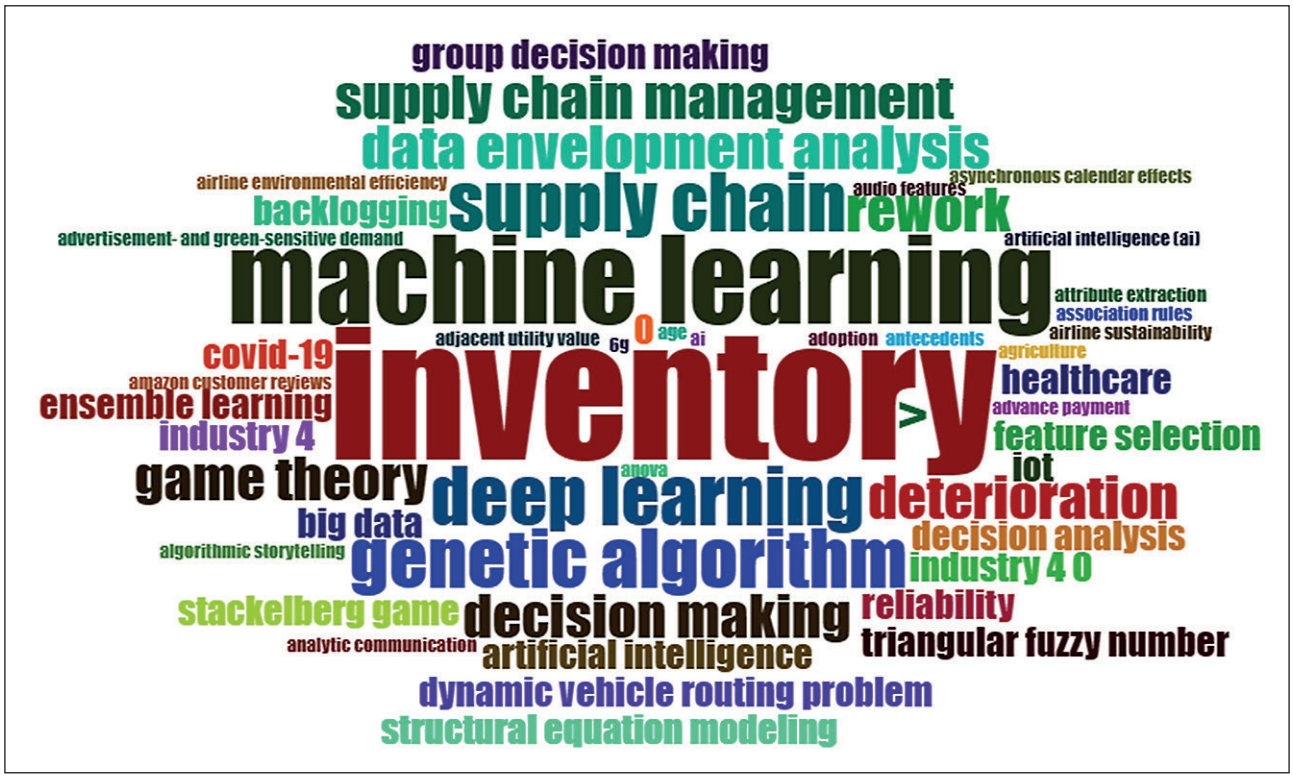

Рис. 2. **«Облако» слов и выражений из релевантных публикаций**

теориях и моделях, новых тенденциях и наиболее актуальных темах и пр. (36)

На рис. 2 показано «облако» слов и выражений, сформированное на основе анализа 83 статей из нашей выборки, в то время как в табл. 3 перечислены наиболее часто встречающиеся термины.

Затем, после выявления наиболее часто встречающихся слов и выражений, мы провели их ранжирование по частоте их появления в исследуемом массиве статей.

Таблица 3

Наиболее часто встречающиеся слова и выражения

Слова и выражения	Частота появления
Инвентаризация	9
Машинное обучение	6
Глубокое обучение	4
Генетический алгоритм	4
Цепочка поставок	4
Анализ среды функционирования	3
Принятие решений	3
Ухудшение	3
Теория игр	3
Переделывать	3
Управление цепочками поставок	3

Благодаря как визуальному, так и табличному представлению становится очевидным, что «инвентаризация» (составление перечня) становится наиболее часто используемым авторами в статьях термином, за которым следуют другие часто используемые термины, такие как «машинное обучение», «глубокое обучение», «генетический алгоритм», «цепочка поставок» и другие.

Следующий шаг – определение, из каких стран исследования ученых имеется наибольшее количество цитирований.

Наиболее цитируемые страны

В табл. 4 представлены десять стран, авторы из которых являются наиболее показательными по цитируемости в области управленческой аналитики, демонстрируя как общее количество цитирований, так и среднее количество цитирований. В то время как Соединенные Штаты Америки лидируют по общему количеству цитирований, они занимают третье место по средней цитируемости статей. Индия занимает второе место по общему количеству цитирований, но отстает по среднему количеству цитируемости статей, занимая восьмое место. Китай занимает третье место по общему количеству

Таблица 4
Страновой анализ: самые цитируемые статьи

Наименование страны	Всего цитирований	Среднее количество цитирований
США	258	14.33
Индия	158	5.85
Китай	97	4.85
Иран	47	11.75
Бразилия	24	24.00
Филиппины	17	8.50
Шри Ланка	15	15.00
Малайзия	11	11.00
Швеция	10	10.00
Канада	4	2.00

цитирований. Обратим внимание, что именно эти три страны имеют существенное преимущество над другими. Обращает на себя внимание Бразилия с самым высоким средним количеством цитирований статей, несмотря на то, что занимает лишь пятое место по общему количеству цитирований. Также стоит выделить значительный вклад в развитие области управленческой аналитики ученых из таких стран, как Иран, Филиппины и Шри-Ланка.

СЕТЕВОЙ АНАЛИЗ

Концептуальные структуры

На рис. 3 представлен сетевой анализ слов и выражений, включающий восемь основных ключевых слов и выражений, организованных в 4 кластера. Первоначальный кластер включает в себя 2 ключевых термина, а именно «запасы» и «ухудшение». Следуя этому примеру, второй кластер содержит 2 ключевых слова: «цепочка поставок» и «теория игр». Третий кластер состоит из таких ключевых слов: «ансамблевое обучение» (обучение на основе алгоритмических композиций) и «выбор признаков». Наконец, четвертый кластер включает в себя следующие два ключевых слова: «Индустрия 4» и «0». Эти основные ключевые слова проливают свет на основные темы и содержание исследований последних лет, а также подчеркивают взаимосвязь этих тем в области научного направления менеджмент и смежных с ним областях.

На рис. 4 представлены тематические карты, полученные по авторским ключевым словам и индексируемым ключевым словам. Эти тематические сети играют важную роль в выявлении неотъемлемых связей внутри предмета, выявлении скрытых закономерностей и выделении ключевых концепций или компонентов, тем самым улучшая понимание композиции и структуры конкретной темы. Изображенная на рис. 4 тематическая сеть демонстрирует

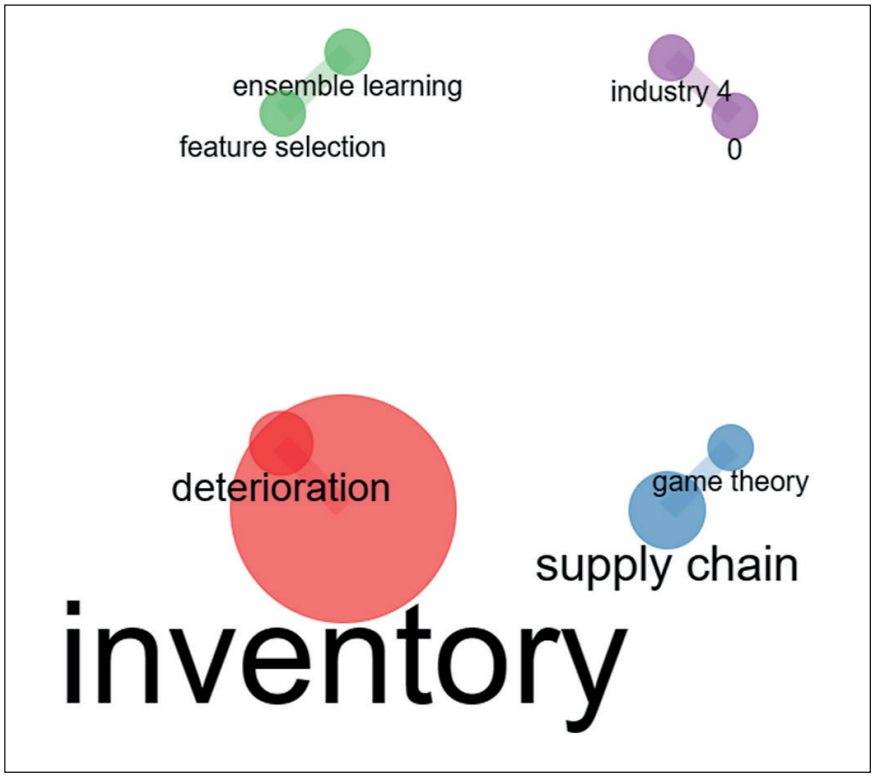

Рис. 3. **Ключевые слова: сетевой анализ совместного появления**

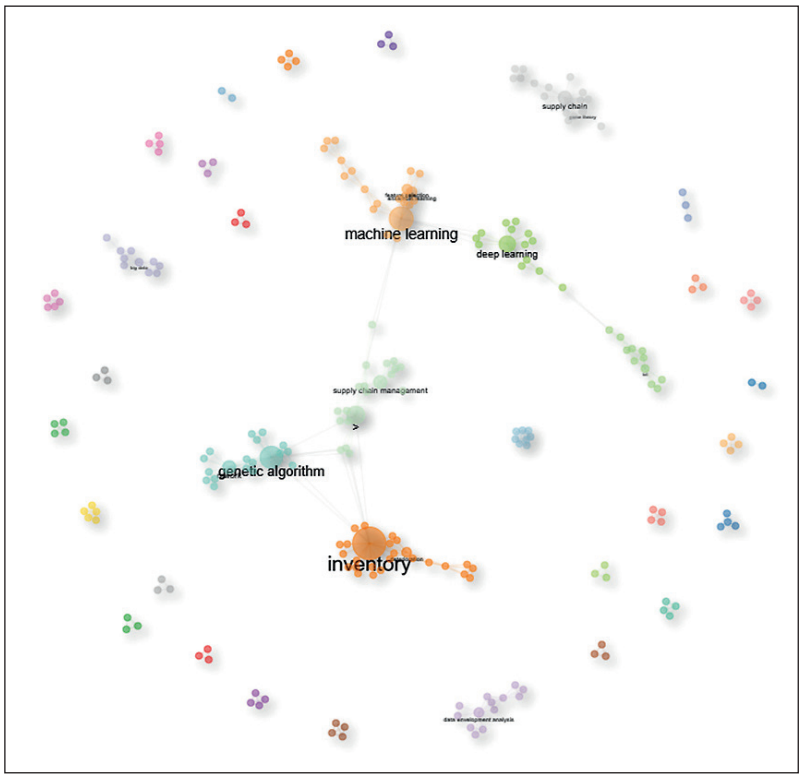

Рис. 4. **Тематическая сеть**

взаимосвязи между обзорными статьями, относящимися к тематике менеджмента, с разделением этих тематик на 10 кластеров. Из визуализации видно, что такие направления, как инвентаризация, глубокое обучение, принятие решений и генетические алгоритмы являются центральными точками в области научного направления менеджмента.

Структуры совместной работы (формирование сетей соавторства)

На рис. 5 представлена полученная по результатам анализа связь соавторов между странами. Исходя из имеющихся данных, страны условно можно разделить на четыре сегмента. Китай демонстрирует самую высокую ценность в полученной сети, на втором месте оказалась Австралия, затем следуют Дания и Соединенные Штаты Америки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Области применения и сценарии использования

Одной из центральных тем в дискуссиях об управленческой аналитике является возможность ее множественного практического приложения в различных отраслях и организационных функциях компаний. Участники (соавторы) часто на примерах показывают, как управленческая аналитика используется для оптимизации бизнес-процессов, улучшения процесса принятия решений в организации, повышения качества обслуживания клиентов и стимулирования инноваций. Для иллюстрации практического воздействия управленческой аналитики в различных контекстах часто приводятся тематические исследования и кейсы (37, 38, 39): например, успешные примеры конвергенции нанотехнологий и аналитики, основанной на больших данных (40, 41).

Технологии и инструменты

Дискуссии об управленческой аналитике в научных статьях также углубляются в использование новейших технологий и инструментов, формирующих эту междисциплинарную область (42). Участники дискуссий могут изучить новые тенденции, такие как искусственный интеллект, машинное обучение, предиктивная аналитика и платформы больших данных. Они могут также обсуждать преимущества и ограничения различных аналитических инструментов, а также соображения по выбору наиболее подходящего технологического стека для конкретных сценариев использования (43, 44).

Управление данными и этические аспекты

Еще одной важной темой в дискуссиях об управленческой аналитике является управление данными с позиции конфиденциальности и этики. Участники часто рассматривают возможные этические послед-

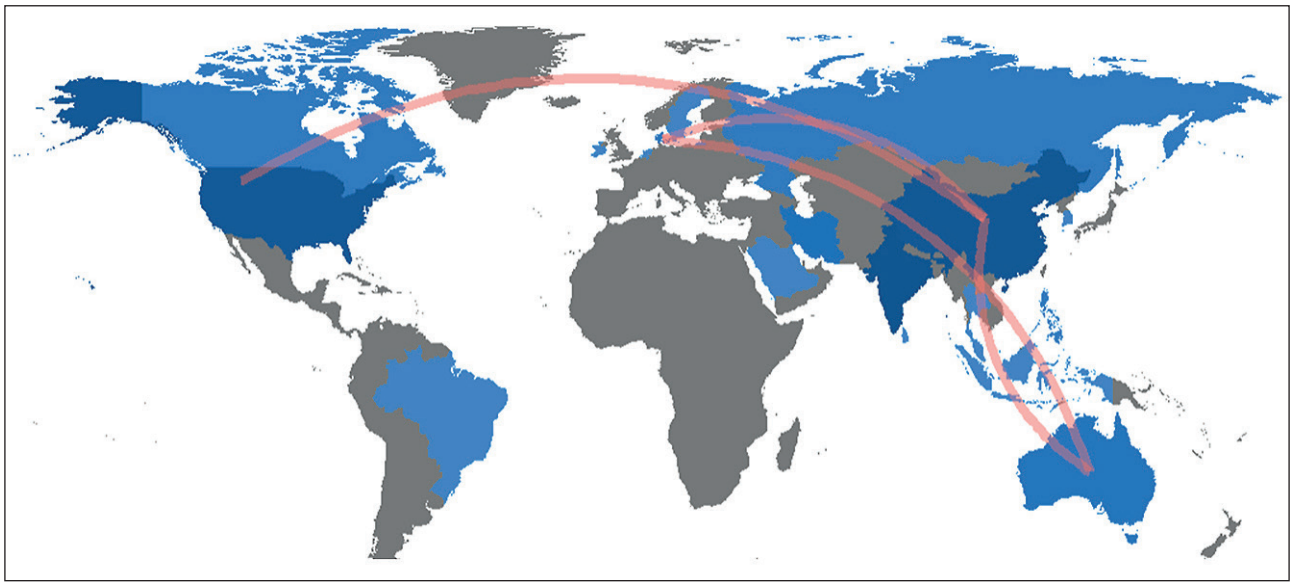

Рис. 5. **Карта межстранового сотрудничества**

ствия сбора, хранения и анализа данных, особенно в отношении таких вопросов, как конфиденциальность данных, согласие и предвзятость (45, 46).

Принципиально важно, что использование инструментов управленческой аналитики для нанотехнологий требует специальных знаний и навыков с учетом специфики ноу-хау, коммерческой тайны и т.д. Специалисты в этой области должны обладать не только глубоким пониманием технических аспектов нанотехнологий, уметь эффективно работать с большими объемами данных, применять современные методы моделирования и анализа, но и обладать этическими навыками работы с информацией, поэтому следует также обратить внимание на малое количество (необходимость) публикаций о подготовке персонала для работы в области управленческой аналитики с учетом специфики производственных процессов, информационной безопасности в области нанотехнологий, особенно на инновационных предприятиях (47).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что управленческая аналитика представляет собой мощный набор инструментов для организаций, стремящихся использовать потенциал принятия решений на основе данных. Благодаря интеграции передовых технологий, таких как искусственный интеллект, машинное обучение и аналитика больших данных, управленческая аналитика позволяет организациям получать ценную информацию, оптимизировать операции и стимулировать инновации. Однако, несмотря на очевидные преимущества управленческой аналитики, реализация ее полного потенциала требует преодоления различных проблем. По мере того как организации продолжают внедрять управленческую аналитику, важно уделять первоочередное внимание инвестициям в инфраструктуру данных, развитие талантов и культурную трансформацию. Развивая культуру, основанную на данных, и инвестируя в правильный стек технологий, организации могут открыть новые возможности для роста, эффективности и конкурентоспособности. Кроме того, по мере развития области управленческой аналитики крайне важно быть в курсе новых тенденций и лучших практик, а также постоянно пересматривать и совершенствовать аналитические стратегии для удовлетворения меняющихся потребностей бизнеса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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/10.15828/2075-8545-2021-13-1-23-31

2. 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

3. 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

4. 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.

5. 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

6. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. Journal of Industrial Information Integration. 2023; 23:100511. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511

7. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A. Quantum information technology. Journal of Industrial Information Integration. 2022; 1;28:100365. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100365

8. Ivanov L.A., Xu L.D., Razumeev K.E., Pisarenko Zh.V., Demenev A.V. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part VI. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(6): 370–378. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-6-370-378

9. Chawla P., Gao J.Z., Gao T., Luo C., Li H., We Y. An interactive web-based solar energy prediction system using machine learning techniques. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 308-335.

10. Saragih H.S. Predicting song popularity based on Spotify's audio features: insights from the Indonesian streaming users. Journal of Management Analytics. 2023; (10:4): 693-709.

11. Gurusinghe R.N., Arachchige B.J.H., Dayarathna D. Predictive HR analytics and talent management: a conceptual framework. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 195-221.

12. Wang X., Zhi J. A machine learning-based analytical framework for employee turnover prediction. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 351-370.

13. Hosseini S. A decision support system based on machined learned Bayesian network for predicting successful direct sales marketing. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 295-315.

14. Liu Q., Yu M., Xiong B., Cai Z., Zhang P., Tan C. Health analytics in business research: a literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 447-476.

15. Fu L., Li Ling, Li Lusi, Zhang W., Luo Z. Impact of hospital size on healthcare information system effectiveness: evidence from healthcare data analytics. Journal of Management Analytics. 2021; (9:2): 211-231.

16. Wang H., Zhang M., Ying H., Zhao X. The impact of blockchain technology on consumer behavior: a multimethod study. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 371-390.

17. Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Muminova S.R., Miloradova N.G. Inventions in the area of nanotechnologiesand 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. Zhou S., Zhan Y. A new method for performance evaluation of decision-making units with application to service industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 84-100.

19. Yin S., Zhang N., Xu J. Information fusion for future COVID-19 prevention: continuous mechanism of big data intelligent innovation for the emergency management of a public epidemic outbreak. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 391-423.

20. Norinder U., Norinder P. Predicting Amazon customer reviews with deep confidence using deep learning and conformal prediction. Journal of Management Analytics. 2022; (9:1): 1-16.

21. Iaksch J., Fernandes E., Borsato M. Digitalization and Big data in smart farming – a review. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 333-349.

22. Ableeva A., Salimova G., Lubova T., Farrahetdinova A., Siraeva R. Evaluation of the efficiency of fixed assets of economic sectors based on index analysis. Journal of Management Analytics. 2022; (9:3): 369-382.

23. Li X., Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Li L. Artificial intelligence applications in finance: a survey. Journal of Management Analytics. 2023; 2;10(4):676-92. https://doi.org/10.1080/23270012.2023.2244503

24. Chen H., Li L., Chen Y. Explore success factors that impact artificial intelligence adoption on telecom industry in China. Journal of Management Analytics. 2021; (8:1): 36-68.

25. Garg D., Alam M. Smart agriculture: a literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 359-415.

26. Bradbury J.D., Guadagno R.E. Enhanced data narratives. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 171-194.

27. Mohammadi S.S., Azar A., Ghatari A.R., Alimohammadlou M. A model for selecting green suppliers through intervalvalued intuitionistic fuzzy multi criteria decision making models. Journal of Management Analytics. 2022; (9:1): 60-85.

28. Shitharth S., Meshram P., Kshirsagar P.R., Manoharan H., Tirth V., Sundramurthy V.P. Impact of Big Data Analysis on Nanosensors for Applied Sciences Using Neural Networks. Journal of Nanomaterials. 2021; ID 4927607. https://doi.org/10.1155/2021/4927607

29. Xie S., Gan C. Classification of territory risk by generalized linear and generalized linear mixed models. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 223-246.

30. Pan S., Ye Q., Shi W. Using a novel ensemble learning framework to detect financial reporting misconduct. Journal of Management Analytics. 2023; (10:4): 607-624.

31. Mahato C., Mahata G.C. Decaying items inventory models with partial linked-to-order upstream trade credit and downstream full trade credit. Journal of Management Analytics. 2021; (9:1): 137-168.

32. Charoontham K., Worakantak J., Kanchanapoom K., Tancho N. A countermeasure designed to restrain self-serving behavior and strategic rating disclosure of credit rating agencies. Journal of Management Analytics. 2023; (10:3): 550-565.

33. Naveen, Donthu, Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of business research. 2021; (133): 285-296.

34. Magaly, Marin, Merigo J.M., Popa S. Twenty years of the Journal of Knowledge Management: A bibliometric analysis. Journal of Knowledge Management. 2018; (22:8): 1655-1687.

35. Talafidaryani, Mojtaba, Jalali S. M. J., Moro S. Tracing the evolution of digitalisation research in business and management fields: Bibliometric analysis, topic modelling and deep learning trend forecasting. Journal of Information Science. 2023; 01655515221148365.

36. Pournia Y. A Study on the Most Frequent Academic Words in High Impact Factor English Nursing Journals: A Corpus-based Study. Iran J Nurs Midwifery Res. 2019;24(1):11-17. doi: 10.4103/ijnmr.IJNMR_190_17. PMID: 30622572; PMCID: PMC6298166.

37. Rahiminia M., Shahrabifarahani S., Mojaradi Z., Aghsami A., Jolai F. A queueing-inventory model to control the congestion of patients and medical waste in the medical centers, a case study. Journal of Management Analytics. 2023; (10:2): 416-445.

38. Ocampo L.A., Vasnani N.N., Chua F.L.S., Pacio L.B.M., Galli B.J. A bi-level optimization for a make-to-order manufacturing supply chain planning: a case in the steel industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:4): 598-621.

39. Solomon S., Ellegood W. A., Pannirselvam G., Riley J. A decision support model for supplier portfolio selection in the retail industry. Journal of Management Analytics. 2021; (8:3): 486-501.

40. Gopukumar S. T. Nano Informatics: The Bridge between Nanotechnology and Data Science. Nanonamed and Nanotechnol 2024, 9(1): 000281. 10.23880/nnoa-16000281.

41. Gurjar R.S., Kumar S. Innovative Practices in Nanotechnology through Artificial Intelligence. Nanomedicine and Nanotechnology. 2024; 9(2). https://doi.org/10.23880/nnoa-16000310

42. Thomann, Eva, Maggetti M. Designing research with qualitative comparative analysis (QCA): Approaches, challenges, and tools. Sociological Methods & Research. 2020; (49:2): 356-386.

43. Sharbini H, Sallehuddin R., Haron H. Crowd evacuation simulation model with soft computing optimization techniques: a systematic literature review. Journal of Management Analytics. 2023; (8:3): 443-485.

44. Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A. Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond. Information Systems Frontiers. 2022. https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w

45. Kim J. H. 6G and Internet of Things: a survey. Journal of Management Analytics. 2021; (8:2): 316-332.

46. Chen W., He W., Shen J., Tian X., Wang X. Systematic analysis of artificial intelligence in the era of industry 4.0. Journal of Management Analytics. 2023; (10:1): 89-108.

47. Ionescu A.M. Nanotechnology and Global Security. Connections QJ. 2016; 15(2):31-47. https://doi.org/10.11610/Connections.15.2.03

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лу Ян – доктор философии, профессор в области менеджмента и инженерных наук, Пекинский университет технологий и бизнеса, Пекин, Китай, ziiyuu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8400-3983

Иванов Леонид Александрович – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов; Москва, Россия, L.a.ivanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9513-8712

Ван Фэньи – аспирант, Пекинский университет технологий и бизнеса, Пекин, Китай, 1299171963@qq.com

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, https://orcid.org/0000-0002-9082-2897

Йе Чэнган – 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

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в подготовку статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-267-275

CC BY 4.0

Technologies of small innovative enterprises as a result of intellectual activity: application of nanotechnologies in the liquidation of orphan wells

Valery M. Trifanichev, Alexey V. Tudvachev, Yaroslav Yu. Guzov, Yuri N. Guzov, Nikolay A. Polyakov*
Saint Petersburg State university, St. Petersburg, Russia
* Corresponding author: e-mail: npregion@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Small innovative enterprises are able to solve the problems of technological support of the construction sector. A special place is occupied by enterprises created on the basis of the results of intellectual activity (RIA) of higher educational institutions. The activities of small companies created with the participation of universities have a number of advantages. The scientific and educational environment creates additional opportunities for small businesses in conducting research and development, as well as opens up access to human resources. An example of the commercialization of RIA is the technological developments based on nanomaterial of St Petersburg University enterprises in solving the problem of abandonment of orphan wells, which contribute to the pollution of groundwater. **Methods and materials.** Abandoned wells are abandoned according to "standard designs" that provide for the abandonment of only the wellbore limited by the inner diameter of the casing pipes, and do not contain technical solutions for the elimination of behind-the-casing flows. **Results.** An ownerless well, after its abandonment according to the "standard project", continues to contaminate groundwater, but on a permanent basis, since repeated abandonment of such wells is practically impossible. Each such "abandoned" well is an officially created channel for groundwater contamination in the long term. **Discussion.** The article contains an analysis of the existing technology of abandonment of wells, including ownerless ones, as well as the justification of the futility of its use to eliminate sources of groundwater pollution. An alternative solution based on the use of modern nanomaterials is proposed. **Conclusion.** Examples of successful application of the proposed technology with the use of cemented nanomaterials for the liquidation of emergency wells in the North-West region are given. Based on the study, conclusions and recommendations are made.

KEYWORDS: small innovative enterprises, nanomaterials, orphan wells, cement stone leaching, behind-the-casing flows, sources of groundwater pollution, reservoir pressure, standard projects, «Plug-back mixture LP».

FOR CITATION:
Trifanichev V.M., Tudvachev A.V., Guzov Ya.Yu., Guzov Yu.N., Polyakov N.A. Technologies of small innovative enterprises as a result of intellectual activity: application of nanotechnologies in the liquidation of orphan wells. *Nanotechnologies in construction.* 2024; 16(3): 267–275. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-267-275. – EDN: DOZISZ.

INTRODUCTION

The competitive environment presupposes the activation of enterprises in the scientific and technical sphere, where the key role is assigned to small innovative enterprises (SMEs). A special place is occupied by enterprises created on the basis of the results of intellectual activity (RIA) of higher educational institutions. The activities of small companies created with the participation of universities have a number of advantages. The scientific and educational environment creates additional opportunities for small businesses in conducting research and development, as well as provides access to human resources (training and advanced training on the basis of the university). Universities actively use the resource base in priority scientific areas not only to conduct fundamental research, but also to stimulate the technological processes of SIE [1–4]. For example, the Sparrow Hills Innovation and Technology Centre is being developed at Moscow State University, and the leading science park with modern unique equipment is being developed at St. Petersburg State University.

© Trifanichev V.M., Tudvachev A.V., Guzov Ya.Yu., Guzov Yu.N., Polyakov N.A., 2024

An example of the successful implementation of technological innovations in the construction sector is the activities of such enterprises as the Geological Centre of St. Petersburg State University and the Water Centre of St. Petersburg State University. The direction of research and commercialization of intellectual property lies in the plane of technological support for projects in petroleum geology, ecology, modeling of groundwater reserves, elimination of the consequences of emergencies due to oil spills, alternative energy, new waterproofing materials and other areas in construction.

New solutions for the environmental protection of water wells are associated with the use of innovative technologies of insulation materials. The problem of groundwater pollution became especially relevant in the post-perestroika period, when many wells that had owners who previously controlled their condition turned out to be ownerless. These were wells of all categories: water intake, parametric, prospecting, exploratory, operational, mothballed and abandoned. Today what is important is not why and how this happened, but the fact that the wells left unsupervised and collapsing in the bowels of the earth cause irreparable damage to groundwater [2, 9].

Over the past decade, work has been carried out in various regions of the Russian Federation to identify and eliminate ownerless wells, mainly water intakes. But the question arises, how exactly are the wells abandoned, and are the sources of groundwater pollution really eliminated with their abandonment?

METHODS AND MATERIALS

Causes of behind-the-casing flows in wells

A source of natural (groundwater) water pollution is defined as "a source that introduces chemical, biological or physical pollutants into surface or groundwater".[1]

It can be seen from the definition that the phrase "source of pollution" does not quite apply to ownerless wells, since drilled wells are only conducting channels through which substances polluting groundwater move from the source towards the aquifer. Therefore, the main task that must be solved during the abandonment of a well is the isolation (elimination) of all channels created in the rock mass during drilling and arrangement of wells.

Such channels include: the internal space of the production (filter) string, connected to the aquifer through its perforated part or open wellbore, and the behind-the-casing space, bounded by the walls of the well and the casing string along their outer diameter. Since the main feature by which ownerless wells are found and fixed are pipes of various diameters located in the ground, sometimes accompanied by the remains of pavilions or concrete rings, then not just wells, but wells with non-recoverable casing pipes are subject to liquidation [15, 16].

To eliminate the possibility of pollutants penetrating into the aquifers, it is necessary to fill the annulus of the well, as well as the internal space of the casing pipes, with a sealed non-destructive material.

Traditionally, it is believed that such a material is oilwell cement slurries [6–8, 15–16, 18], but inspections of production wells for the tightness of their behind-the-casing space indicate the opposite.

Let us consider the conditions for the formation of cement stone in the annulus space at the stage of drilling and well construction, as well as the causes for the inevitable occurrence of behind-the-casing flows in wells when using cement slurries as an insulation material.

High-quality insulation of casing strings and separation of productive formations is a condition for long-term trouble-free operation of wells. Interlayer inflows and annular flows that appear at the initial stage of well operation are the result of the formation of a microannular space at the rock-casing contact already at the stage of cement stone formation [10].

During drilling and wellbore formation, the existing balance of stresses in the rock mass is disturbed, but is compensated by the hydrostatic pressure of the drilling fluid injected into the well during drilling. Properly selected drilling fluid parameters eliminate the negative impact of both rock and reservoir pressures on the well walls. During the construction of wells in the intervals determined by the design solutions for their construction, casing pipes are installed, designed mainly for fixing the walls, and in production wells also for the installation of water-lifting equipment. To separate the horizons penetrated by the well, oilwell cement slurries are traditionally used, as a result of the crystallization of which cement stone is formed in the behind-the-casing space.

It is generally accepted that during casing cementation, the cement slurry delivered to the casing space instead of the flushing fluid used in drilling maintains the stress balance established in the rock mass and, consequently, excludes the negative impact of reservoir pressure on the forming cement stone [5, 13]. But that's not the case. The hydrostatic pressure created by the cement slurry in the casing space decreases after the beginning of its crystallization and after 4–5 hours has almost zero values (Fig. 1) [12, 17].

This means that after the hydrostatic pressure of the cement slurry drops below the bedded pressure, compressive pressure is exerted on the forming cement stone from the aquifer, and it contributes to the formation of a microannular space in contact with water-bearing rocks

[1] National Standard of the Russian Federation GOST R 59053-2020. Environmental protection. Protection and rational use of waters. Terms and definitions.

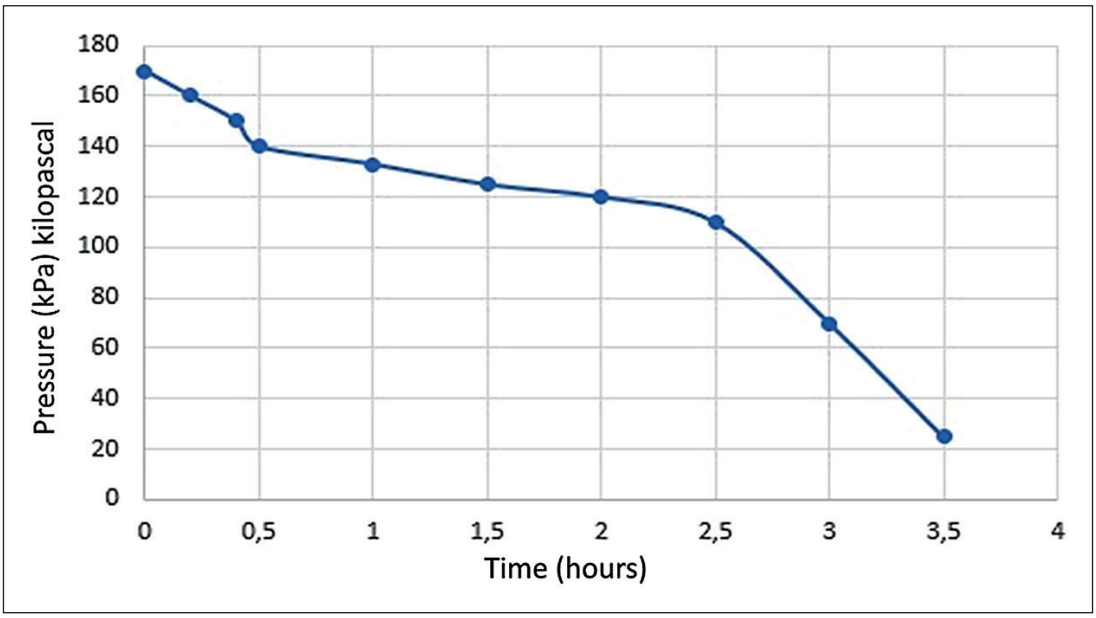

Fig. 1. **Change in the hydrostatic pressure of the cement slurry in the time range after the beginning of its crystallization**

[12]. Under the influence of reservoir pressure, the leachate from the aquifer rushes into this micro-ring space, impairing the adhesion of the forming cement stone to the rocks located higher in the section (Fig. 2).

After cementation of the casing space in the process of further drilling of the well to the design depth, casing pipes and cement stone are subjected to dynamic loads by rotating drill pipes, which contributes to the formation

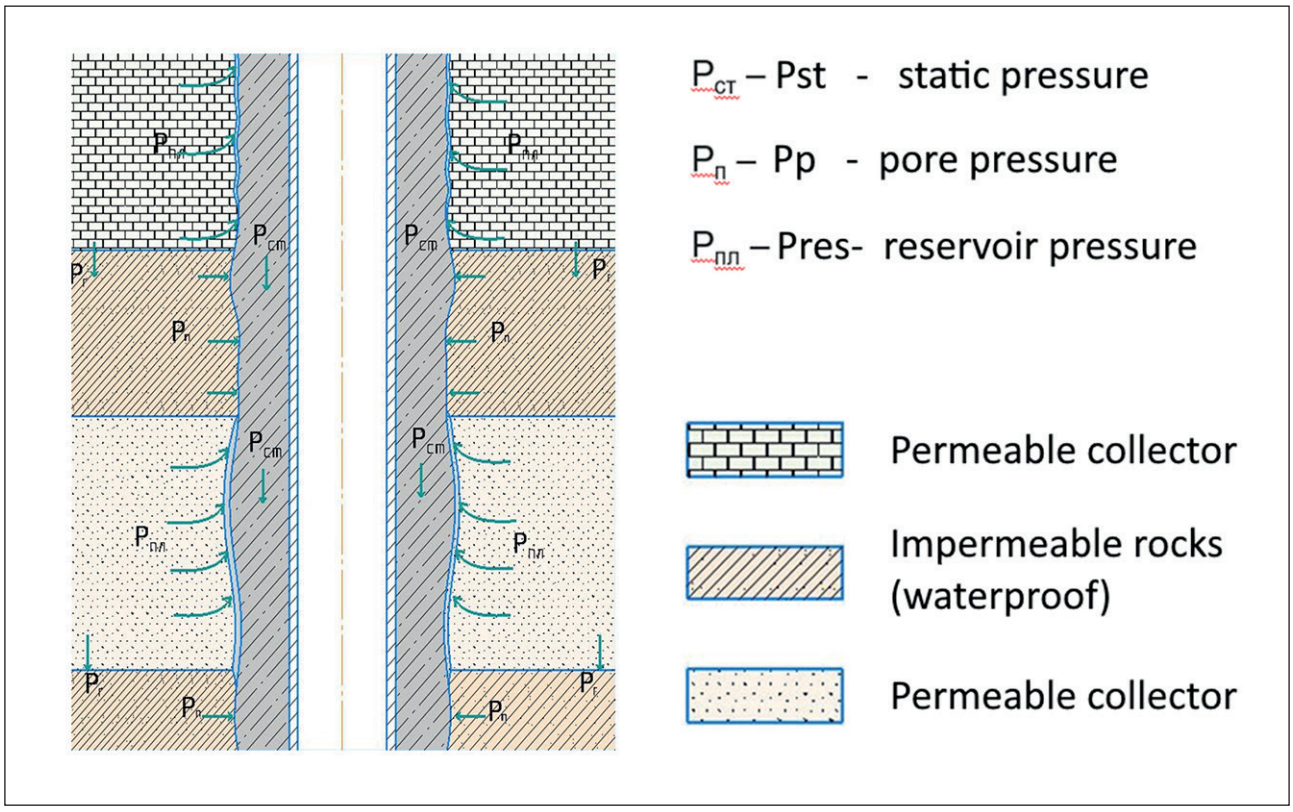

Fig. 2. **Formation of cement stone in the space behind the column**

of microcracks already at the casing pipe-cement stone contact. Thus, already at the stage of drilling and arrangement of the well, conditions are created for the occurrence of behind-the-casing flows in its behind-the-casing space. Over time, the aggressive action of formation filtrates contributes to the leaching of cement stone and transformation of microcracks into full-fledged cracks with gradual destruction of cement stone. Since cement-based hardening cement slurries are used in all wells without exception, the destruction of cement stone in the behind-the-casing space is a natural and inevitable phenomenon. The period of occurrence of behind-the-casing flows depends only on the values of reservoir pressures of the exposed horizons, the quality of the cement slurry and the technology of its delivery to the behind-the-casing space.

Knowing what behind-the-casing isolation technologies were used in the construction of hydrogeological wells and wells for solid minerals (especially in the post-perestroika period), it can be unequivocally stated that wells that have been in operation for more than 10 years already have behind-the-casing flows. The only exception is the case when water-sensitive clay rocks are present in the geological section opened by the well, which, when interacting with water, swell and fill the voids formed in the space behind the casing during the destruction of the cement stone.

RESULTS AND DISCUSSION

Abandonment of wells according to standard designs

Most ownerless wells intended for abandonment have a service life of more than 25 years, that is, all of them have behind-the-casing flows.

In order to officially abandon a well, it is necessary to develop design documentation for its abandonment [14], and this requires initial technical information about it. As a rule, there is no technical documentation for an ownerless well. Pre-project inspection of ownerless wells is reduced to determining the coordinates of the discovered wellhead, visual inspection of casing pipes coming to the surface, measuring their diameters and current depths. The rest of the parameters necessary for the development of design solutions can be found in the record cards that are stored in geological funds. However, it is not possible to find these cards for all wells, and the information indicated in them does not always coincide with the data obtained during a visual inspection of the well. As a rule, special work on the wellbore survey in order to determine the actual depth and structure is not carried out before the development of design solutions for its abandonment. Therefore, the initial data for the development of projects for the abandonment of ownerless wells are conditional, as well as the design solutions themselves.

The only (and very old) regulatory legal act that regulates technical solutions for the abandonment of all wells (except for oil and gas wells) in order to *"... prevent pollution and salinization of aquifers through the well, as well as undesirable mixing of waters of different quality and depletion of aquifers during gushing"* – these are the "Rules for liquidation plugging of boreholes for various purposes, backfilling of mine workings and abandoned wells to prevent pollution and depletion of groundwater. 1967 (hereinafter referred to as the "Rules") [16]. But it also defines the abandonment of a well as "*...Filling the wellbore (full plugging) or part of it (partial plugging) with cement, clay or other impermeable material...*" [16]. And, although the Rules contain sections devoted to the elimination of behind-the-casing flows in wells with non-recoverable casing, the wording used allows unscrupulous designers to justify a technology convenient for the Customer in order to save on the abandonment of wells that are no longer needed by anyone. After all, the abandonment of an ownerless well alone is an order of magnitude cheaper compared to the complete abandonment of a well, which includes the insulation of the annulus.

Technical solutions for well abandonment according to the "standard design" are as follows:

- development of the wellbore and its cleaning from debris that has accumulated there or has been artificially created, from the wellhead to the real bottom;
- cleaning of casing pipe walls from corrosion and flushing of the entire wellbore after the above operations;
- disinfection of the aquifer followed by backfilling of the sand and gravel mixture into the perforated part of the filter column (at the interval of the aquifer);
- filling of the wellbore with backfill material (usually cement mortar);
- wellhead arrangement, including digging a pit around the casing pipe (pipes if more than one string enters the surface); cutting these pipes below the surface level and welding the cut pipe(s) with a metal plate; erection of a concrete bollard with an appropriate identification plate. [21].

The final document fixing the abandonment of an ownerless well is an act signed by the parties involved in this process, on the basis of which information on the elimination of the source of groundwater pollution is transmitted to the authorities.

From the described technology, it is obvious that design solutions for the abandonment of ownerless wells, in which there are non-recoverable casing pipes, are reduced only to the liquidation of their wellbores. The need to insulate the behind-the-casing space of the well is not mentioned in the "standard designs", technical solutions for the elimination of behind-the-casing flows are not being developed, no work is being carried out in the behind-the-casing space of wells.

Clause 22 of the Rules states: *"Wells that have opened several aquifers with different chemical compositions and with different groundwater pressures shall be plugged by installing cement bridges at the intervals of aquicludes that separate the aquifers... The number of cement bridges is equal to the number of aquifers*" [16]. As you know, nothing is the same in nature, heads of groundwater are always different, which means that it is necessary to design the installation of bridges in all wells that have opened aquifers. But it is this clause 22 that is used to justify the exclusion of behind-the-casing insulation during well abandonment. It is enough to substantiate, based on modern hydrogeological studies, that there are (conditionally) no regional aquicludes, and the horizons included in the conditionally combined aquifer complex have similar heads and chemical composition, and the work to eliminate behind-the-casing overflows can be excluded from the design solutions. And if we rely not only on modern research, but also look at the stock materials (reports compiled 50–60 years ago), it turns out that the same aquifers present in the region had not only aquicludes, but also different static levels and chemical composition of water [16]. In addition to the information already available, the number of wells drilled in this region over the past 50 years (including those that have already been abandoned) and the similarity of the parameters of the aquifers included in the joint complex become quite explainable.

It is worth recalling that the lack of insulation of the casing space in wells contributes to the entry of pollutants into the aquifers not only from the horizons located downstream of the section, but also from the surface of the earth: during snow melting, with rain streams [21]. And the presence of behind-the-casing water manifestations (griffins) in the wells that have opened the pressure horizon contributes to a change in the hydraulic parameters of all overlying permeable horizons, increasing groundwater levels, and thereby complicating construction work (for example, the city of Velikiye Luki, Pskov region) [20].

What can happen (and is happening) with wells abandoned according to "standard designs" in the long term is shown in Figure 3.

Abandonment of the wellbore does not eliminate the entry of pollutants into the aquifers through the behind-the-casing space from pollution sources located both at depth and on the surface. Only one channel through which toxic substances enter aquifers is being eliminated. The main channel – the behind-the-casing space of the well – remains open and accessible for the entry of pollutants into groundwater. At the same time, the behind-the-casing space of wells tends to increase in volume due to the destruction of unstable rocks that make up the walls of wells (Fig. 3) [21].

After signing the well abandonment certificate by the parties involved in the process, the well receives the official status of abandoned, but at the same time there retains the ability to move pollutants through the behind-the-casing space. The probability of re-abandonment of the well is zero, since it is possible to get into the wellbore after its cementation only after the removal of the wellhead material (cement stone) from it, i.e. after its drilling, but in old wells this is associated with the risk of violating the integrity of the casing pipes [21].

Fig. 3. **Consequences of well abandonment according to the "standard design"**

Thus, wells, that are subject to abandonment but have not yet been abandoned, can be considered temporary conductors of pollutants, since under favorable circumstances they can be abandoned in full, i.e. with the separation of horizons in the casing space of the well. As long as the well is not abandoned, this possibility remains, even if only theoretically. A well, in which only the wellbore, i.e. the inner space of the casing pipes, has been abandoned according to the "standard design", becomes a permanent conductor of pollutants into groundwater, i.e. channels for the migration of substances polluting groundwater remain and it is no longer possible to eliminate them [21].

Thus, the abandonment of wells, including ownerless ones, according to the "standard design" instead of protecting groundwater leads to their further permanent and irremediable pollution, but officially [21].

As an alternative to "standard projects" for the abandonment of wells, including ownerless wells, design solutions are offered based on the technology of abandonment of overflow wells with behind-the-casing flows (griffins), which has been practiced in the North-West region for more than 10 years [20]. The basis of this technology is *the nanomaterial* "Plug-back mixture LP", which has proven itself very well in the liquidation of overflowing wells with behind-the-casing flows. And only thanks to this material, it became possible to repair

and abandon wells that opened the pressure aquifer at a depth of less than 30 m.

In its initial state, the "Plug-back mixture LP" is a viscoelastic mixture that is delivered to the area of the water manifestation source, fills the pores and cracks of the host rocks, colmating the latter. A distinctive feature of the presented material is its ability to increase in volume when in contact with water, displace water from pores and cracks, filling the vacated space. [19]. In addition, when entering a water stream (e.g., a stream of water moving in a casing space and having a discharge at the wellhead or in the overlying permeable horizon), the homogeneous mass of the Plug-back mixture LP separates into small particles, which rush along the flow into the reclaimed channels. Gradually swelling and getting stuck in narrow places, and then sticking to each other, the particles of the cement mixture, as it were, gather again into a homogeneous mass and colmate the channels through which the water moved. Possessing good adhesive properties to casing metal and rocks, Plug-back mixture LP forms a non-hardening, hydrophobic shield that prevents the movement of filtrate in the casing space. The shield being created is capable of withstanding reservoir pressures of more than 5 MPa. [20]. Technological properties of the Backfill Slurry make it possible to liquidate and repair overflowing wells with griffins, which have opened pressure horizons at a depth of 10 m or more. The grouting material is resistant to dynamic loads and, in the event of the latter (subsidence of the soil, etc.), is able to independently fill newly formed voids and (or) cracks, colmating them. A plastic impermeable hydrophobic shield is created in the casing space, separating the aquifers.

Over the 10 years of the technology's existence, more than 40 overflowing wells with behind-the-casing flows have been repaired and abandoned, and in almost all wells, the roof of the pressure aquifer lay at a depth of up to 50 m. There were no negative results. There is experience in using plug-back mixtures LP as an insulating material for casing pipes at the stage of construction of water wells equipped on a pressure aquifer.

As a demonstration of the practical application of the technology described above, we will limit ourselves to just two examples.

The abandonment of the well in the city of Belozersk, which opened the pressure horizon at a depth of 20 m, was carried out according to the technology described above using the "Plug-back mixture LP". Since the wellhead was lost due to the intensive development of the griffin funnel, in order to prevent suffusion and further development of the funnel, the latter was filled with gravel. And to deliver the backfill material to the roof of the aquifer, auxiliary wells had to be drilled. Figures 4–5 depict the moment of maximum development of the funnel and the site after the work on the localization of water manifestation [11].

In 2016, on the territory of a cottage village located in the valley of the Setovka stream, during the drilling of an exploratory water well (16 Polevoy Lane) from a depth of 9 m, there was an outpouring of water with a characteristic smell of hydrogen sulfide, with a flow rate of 80 m^3/h and a static level of +15–17 m. In contrast to the case in Belozersk, the flow rate of the well decreased over time, and at the time of the beginning of the abandonment did not exceed 25–30 m^3/h. The work was complicated by the low depth of the well, but the technology developed by the specialists of the Geological Center of St. Petersburg State University and the use of the nanomaterial "Plug-back mixture LP" made it possible to eliminate water leaks. Figures 6–7 depict the moment of the beginning of water manifestation and the territory of the site after the abandonment of the well and its arrangement [20].

METHODS AND MATERIALS

For the abandonment of abandoned wells in full, i.e. isolation of all conductive channels that contribute

Fig. 4. **Scale of development of the griffin funnel**

Fig. 5. **Area after well abandonment**

Fig. 6. **Well under repair, 2016**

Fig. 7. **Area after well abandonment, Oct. 2021**

to the entry of pollutants into aquifers associated with a particular well the following technology is proposed.

Since casing pipes are installed in abandoned wells and it is not possible to extract them, preliminary perforation of casing strings above the roof of the aquifer is necessary to deliver the backfill material to the annulus. For their perforation, it is proposed to use pipe cutters used in the elimination of accidents in wells. Pipe cutters, by the principle of their operation, allow you to form windows along the circumference of the casing pipes. They are easy to operate and, unlike shaped rotary hammers, do not require special permits for their use. The width of the formed windows is determined by the width of the pipe cutter incisors and is within 10–12 mm, which is enough to deliver LP backfill material to the behind-the-casing space. If necessary, the number of process windows can be increased to two or three.

The cement packer on the injection string (drill pipes of the TBSU) is installed in the well above the process window (if there are several of them, then higher than the uppermost one) by 200–300 mm and expanded. A confined space is created under the packer with an exit to the pipe through technological holes.

Prior to the insulation works, the annulus tightness is tested with a pressure of no more than 1 MPa, based on the results of which a decision is made either to carry out work on the insulation of the behind-the-casing space, in the presence of behind-the-casing flows, or to dismantle the injection equipment, in case of establishing the fact of tightness of the behind-the-casing space.

Only after the completion of all the above complex of works should the wellbore be insulated. And as an insulating material for the elimination of channels created by a drilled well in a rock massif, which contribute to the pollutions of groundwater, the technology prescribes the use of the nanomaterial “Plug-back mixture LP”.

CONCLUSION

1. A well abandoned according to the “standard design”, i.e. without elimination of behind-the-casing flows, continues to have a negative impact on groundwater.

2. When developing design solutions for abandonment of wells with non-recoverable casing pipes, measures should be taken to eliminate behind-the-casing flows. And when they are abandoned, the behind-the-casing space of wells should be insulated with an impermeable nanomaterial “Plug-back mixture LP”, which ensures the separation of aquifers in the long term.

3. It is necessary to review and revise the regulatory document “Rules for liquidation plugging of boreholes for various purposes, backfilling of mine workings and abandoned wells to prevent pollution and depletion of groundwater. 1967” and to make changes to the technology of well abandonment taking into account modern innovative technologies and experience in the use of the nanomaterial “Plug-back mixture LP” in the abandonment of overflowing wells and griffin formations.

4. For the period of work on the development and approval of a new regulatory document defining the technology of abandonment of wells with the mandatory elimination of behind-the-casing flows, it is necessary to suspend work on the design and abandonment of wells, primarily ownerless wells.

5. The solution to the problem of environmental protection of boreholes is based on the technological innovations of the university’s SIEs: the development of insulating nanomaterials capable of effectively solving the problems of groundwater pollution.

REFERENCES

1. Motovilov O.V. (ed.) *Management of Innovations and Intellectual Property of the Firm*. Monograph. 2nd edition. Moscow, Prospekt; 2018.

2. Polyakov N.A. Formation of the strategy of small innovative enterprises of St. Petersburg State University. *Sustainable development: society and economy. Materials of the III International Scientific and Practical Conference "Sustainable Development: Society and Economy"*. St. Petersburg State University. Scythia-Print LLC St. Petersburg; 2016.

3. Guzov Yu.N., Polyakov N.A., Titov V.O., Vashchuk A.E. Conditions for the Russian Federation Arctic zone innovative development. *E3S Web of Conferences International Conference on Efficient Production and Processing*, ICEPP 2020. Volume 161; 2020.

4. Lukashov N.V. *Ekonomika znanii* [Economics of Knowledge]. Publisher: Prospekt LLC, Moscow; 2020.

5. Agadulin I.I., Ignatyev V.N., Sukhorukov R.Y. Ecological Aspects of Leakiness of Behind-the-Casing Space in Wells for Various Purposes. *Electronic Journal Oil and Gas Business*. 2011; 4.

6. Basargin Yu.M. *Technology of overhaul and underground workover of oil and gas wells.* Krasnodar. Owl. Kuban; 2002.

7. Bashkatov D.N., Rogovoy V.L. *Drilling of water wells.* Moscow. Kolos; 1976.

8. Bulatov A.I., Danyushevsky V.S. *Cement materials*. Moscow. Subsoil; 1987.

9. Vyazov B. The problem of abandoned wells requires an urgent solution. *Oil and Capital Magazine*, 2024; January.

10. Egorova E.V., Vybornova T.S. Well casing. Analysis of the formation of fluid-developing channels in the cemented space of wells and measures to ensure high-quality support. *Nefteservis*. 2017; 2.

11. Nadezhen A. *Taming the "hellwell"*. Vologda. Region. 04.04.2020.

12. Piskunov E.L., Leusheva E.L. Analysis of the Causes of the Appearance of Behind-the-Column Flows. *Collection of reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, dedicated to the 60th anniversary of the Department of Well Drilling*. Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2014; 288-295.

13. Ponizov, A.V., Vereshchagin, P.M., Chulkov, N.V., et al. Conditions, Consequences and Ways to Prevent Behind-the-Casing Fluid Flows through Wellbore Sites at Sites of Deep Disposal of Liquid Radioactive Waste. J*ournal Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2019; 2: 56-67.

14. Resolution No. 2127 dated November 30, 2021 "On the Procedure for Preparing, Coordinating and Approving Technical Projects for the Development of Mineral Deposits, Technical Projects for the Construction and Operation of Underground Structures, Technical Projects for the Liquidation and Conservation of Mine Workings, Boreholes and Other Structures Related to the Use of Subsoil, by Types of Minerals and Types of Subsoil Use".

15. Safety rules in the oil and gas industry. "Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision. Order No. 534 dated December 15, 2020.

16. Rules for liquidation of plugging of boreholes for various purposes, backfilling of mine workings and abandoned wells to prevent pollution and depletion of groundwater. Ministry of Geology, 1967.

17. Raikevich S.I. Inter-column pressures and behind-the-casing movements of fluids in wells. Ways to solve the problem. *Proceedings of the International Technological Symposium "Intensification of Oil Production"*. Institute of Oil and Gas Business.Moscow; 2003: 579-587.

18. Ryazanov Y.A. *Encyclopedia of drilling fluids.* "Letopis" Publishing House; 2005.

19. Trifanichev V.M. Innovative Technologies in the Creation of Impervious Curtains. *Journal Hydrotechnics*. 2009; 4(17).

20. Trifanichev V.M., Tudachev A.V. Pouring Wells: What Are They Dangerous about and What is To Do with It. 2022; 7: 54-63.

21. Trifanichev V.M. Liquidation of ownerless wells. *Geology and Subsoil Use*. 2022; 6(10): 86-93.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey V. Tudvachev – General Director of the Water Center of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, head of the international association of hydrogeologists in the Russian Federation (IAH), expert of the federal state reserves committee of Rosnedra, UNECE expert on groundwater

Yaroslav Yu. Guzov – Development Director, Geological Center of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Valery M. Trifanichev – Chief Engineer of the Geological Center of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Yuri N. Guzov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Audit, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, Academic Supervisor of the Master's Programme in Accounting, Analysis and Audit at the Faculty of Economics, Member of the Public Council of the Federal Treasury of the Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-5710-5300

Nikolay A. Polyakov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Enterprise Economics, Entrepreneurship and Innovation, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, npregion@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4509-8913

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Aleksey V. Tudvachev – idea, scientific guidance; research concept of the study, development of methodology.

Yaroslav Yu. Guzov – collection of material, processing of material, writing an article, drawing up final conclusions.

Valery M. Trifanichev – idea, scientific guidance, writing the source text of the article, development of methodology, graphical and tabular presentation of research results, drawing up final conclusions, literary review.

Yuri N. Guzov – processing of material, writing of an article, scientific editing of the text, compilation of final conclusions.

Nikolay A. Polyakov – collection of material, processing of material, writing an article, scientific editing of the text, compilation of final conclusions, literary review.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 27.02.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 09.06.2024.

Научная статья
УДК 556
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-267-275

CC BY 4.0

Технологии малых инновационных предприятий как результат интеллектуальной деятельности: применение нанотехнологий при ликвидации бесхозных скважин

Валерий Михайлович Трифаничев, Алексей Викторович Тудвачёв, Ярослав Юрьевич Гузов, Юрий Николаевич Гузов, Николай Александрович Поляков*
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: npregion@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Малые инновационные предприятия способны решать задачи технологического обеспечения строительной сферы. Особое место занимают предприятия, созданные на основе результатов интеллектуальной деятельности (РИД) высших учебных заведений. Деятельность малых компаний, созданных с участием университетов, обладает рядом преимуществ. Научная и образовательная среда создает дополнительные возможности для малого бизнеса в проведении научных исследований и разработок, а также открывает доступ к кадровому потенциалу. Примером коммерциализации РИД выступают технологические разработки на основе наноматериала предприятий СПбГУ в решении проблемы ликвидации бесхозных скважин, способствующих загрязнению подземных вод. **Методы и материалы.** Ликвидация бесхозных скважин осуществляется по «типовым проектам», предусматривающим ликвидацию только ствола скважины, ограниченного внутренним диаметром обсадных труб, и не содержат технических решений для ликвидации заколонных перетоков. **Результаты.** Бесхозная скважина после ее ликвидации по «типовому проекту» продолжает загрязнять подземные воды, но уже на постоянной основе, т.к. повторная ликвидация таких скважин практически невозможна. Каждая такая «ликвидированная» скважина – это официально созданный канал для загрязнения подземных вод в долгосрочной перспективе. **Обсуждение.** Статья содержит анализ существующей технологии ликвидации скважин, в том числе и бесхозных, а также обоснование бесперспективности ее применения для устранения источников загрязнения подземных вод. Предлагается альтернативное решение, основанное на использовании современных наноматериалов. **Заключение.** Приведены примеры успешного применения предлагаемой технологии с использованием тампонажных наноматериалов для ликвидации аварийных скважин в Северо-Западном регионе. На основе исследования сделаны выводы и рекомендации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Малые инновационные предприятия, наноматериалы, бесхозные скважины, выщелачивание цементного камня, заколонные перетоки, источники загрязнения подземных вод, пластовое давление, типовые проекты, «Тампонажная смесь ЛП».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Трифаничев В.М., Тудвачёв А.В., Гузов Я.Ю., Гузов Ю.Н., Поляков Н.А. Технологии малых инновационных предприятий как результат интеллектуальной деятельности: применение нанотехнологий при ликвидации бесхозных скважин // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 267–275. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-267-275. – EDN: DOZISZ.

ВВЕДЕНИЕ

Конкурентная среда предполагает активизацию предприятий в научно-технической сфере, где ключевая роль отведена малым инновационным предприятиям (МИП). Особое место занимают предприятия, созданные на основе результатов интеллектуальной деятельности (РИД) высших учебных заведений. Деятельность малых компаний, созданных с участием университетов, обладает рядом преимуществ. Научная и образовательная среда создает дополнительные возможности для малого бизнеса в проведении научных исследований и разработок, а также открывает доступ к кадровому потенциалу

© Трифаничев В.М., Тудвачёв А.В., Гузов Я.Ю., Гузов Ю.Н., Поляков Н.А., 2024

(подготовка и повышение квалификации на базе вуза). Университеты активно используют ресурсную базу по приоритетным научным направлениям не только для проведения фундаментальных исследований, но и для стимулирования технологических процессов МИП [1–4]. Так, в МГУ развивается Инновационно-технологический центр «Воробьевы горы», а в СПбГУ – ведущий научный парк, обладающий современным уникальным оборудованием.

Примером успешного внедрения технологических инноваций в строительной сфере выступает деятельность таких предприятий, как МИП «Геологический центр СПбГУ» и МИП «Водный центр СПбГУ». Направления исследований и коммерциализации РИД лежат в плоскости технологического обеспечения проектов нефтяной геологии, экологии, моделирования запасов подземных вод, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций вследствие разливов нефтепродуктов, альтернативной энергетики, новых гидроизоляционных материалов и других направлений в строительстве.

Новые решения экологической защиты водных скважин связаны с применением инновационных технологий изоляционных материалов. Проблема загрязнения подземных вод стала особо актуальной в постперестроечный период, когда множество скважин, имевших собственников, которые прежде осуществляли контроль за их состоянием, оказались бесхозными. Это были скважины всех категорий: водозаборные, параметрические, поисковые, разведочные, эксплуатационные, законсервированные и ликвидированные. Сегодня важно не то, почему и как это произошло, а то, что оставшиеся без надзора и разрушающиеся в недрах земли скважины наносят невосполняемый урон подземным водам [2, 9].

В последние десятилетия в различных регионах РФ проводятся работы по выявлению и ликвидации бесхозных скважин, в основном, водозаборных. Но возникает вопрос, как именно ликвидируются скважины и действительно ли с их ликвидацией устраняются источники загрязнения подземных вод?

Причины образования заколонных перетоков в скважинах

Источник загрязнения природных (подземных) вод определяется как «источник, вносящий в поверхностные или подземные воды химические, биологические или физические загрязнители»[1].

Из определения видно, что словосочетание «источник загрязнения» к бесхозным скважинам не совсем подходит, т.к. пробуренные скважины являются лишь проводящими каналами, по которым вещества, загрязняющие подземные воды, перемещаются от источника в сторону водоносного горизонта. Следовательно, основная задача, которая должна решаться при ликвидации скважины, – это изоляция (устранение) всех каналов, созданных в горном массиве при бурении и обустройстве скважин.

К таким каналам относятся: внутреннее пространство эксплуатационной (фильтровой) колонны, соединенное с водоносным горизонтом через ее перфорированную часть или открытый ствол, и заколонное пространство, ограниченное стенками скважины и колонной обсадных труб по их наружному диаметру. Так как основным признаком, по которому находят и фиксируют бесхозные скважины, являются трубы различных диаметров, расположенные в земле, иногда сопровождаемые остатками павильонов или бетонных колец, то ликвидации подлежат не просто скважины, а скважины с неизвлекаемыми обсадными трубами [15, 16].

Для устранения возможности проникновения загрязняющих веществ в водоносные горизонты необходимо затрубное пространство скважины так же, как и внутреннее пространство обсадных труб, заполнить герметичным неразрушающимся материалом.

Традиционно считается, что таким материалом являются тампонажные цементные растворы [6–8, 15–16, 18], однако обследования эксплуатационных скважин на предмет герметичности их заколонного пространства говорят об обратном.

Рассмотрим условия формирования цементного камня в затрубном пространстве на стадии бурения и обустройства скважин, а также причины неизбежного возникновения заколонных перетоков в скважинах при использовании тампонажных цементных растворов в качестве изоляционного материала.

Качественная изоляция обсадных колонн и разобщение продуктивных пластов является условием долговечной безаварийной эксплуатации скважин. Появляющиеся в начальной стадии эксплуатации скважин межпластовые перетоки и затрубные перетоки являются результатом формирования микрокольцевого пространства на контакте «горная порода-обсадные трубы» уже на стадии формирования цементного камня [10].

При бурении и формировании ствола скважины существующий баланс напряжений в горном массиве нарушается, но компенсируется гидростатическим давлением бурового раствора, нагнетаемого в скважину при бурении. Правильно подобранные параметры бурового раствора устраняют негативное

[1] Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 59053-2020. Охрана окружающей среды. Охрана и рациональное использование вод. Термины и определения.

воздействие на стенки скважины как горного, так и пластового давлений. При сооружении скважин в интервалы, определенные проектными решениями для их строительства, устанавливаются обсадные трубы, предназначенные в основном для крепления стенок, а в эксплуатационных скважинах еще и для монтажа водоподъемного оборудования. Для разобщения вскрытых скважиной горизонтов традиционно используются тампонажные цементные растворы, в результате кристаллизации которых в заколонном пространстве формируется цементный камень.

Принято считать, что при цементации обсадных колон тампонажный раствор, доставленный в заколонное пространство скважины взамен используемой при бурении промывочной жидкости, поддерживает установившийся в горном массиве баланс напряжений и, следовательно, исключает негативное воздействие пластового давления на формирующийся цементный камень [5, 13]. Но это не так. Гидростатическое давление, создаваемое цементным раствором в заколонном пространстве, после начала его кристаллизации снижается и через 4–5 часов имеет практически нулевые значения (рис. 1) [12, 17].

Это означает, что после падения гидростатического давления цементного раствора ниже пластового на формирующийся цементный камень оказывается сжимающее давление со стороны водоносного горизонта, и оно на контакте с водовмещающими породами способствует образованию микрокольцевого пространства [12]. Под действием пластового давления фильтрат из водоносного горизонта устремляется в это микрокольцевое пространство, ухудшая сцепление формирующегося цементного камня с горными породами, расположенными выше по разрезу (рис. 2).

После цементации заколонного пространства в процессе дальнейшего бурения скважины до проектной глубины на обсадные трубы и цементный камень оказывают динамические нагрузки вращающиеся бурильные трубы, что способствует обра-

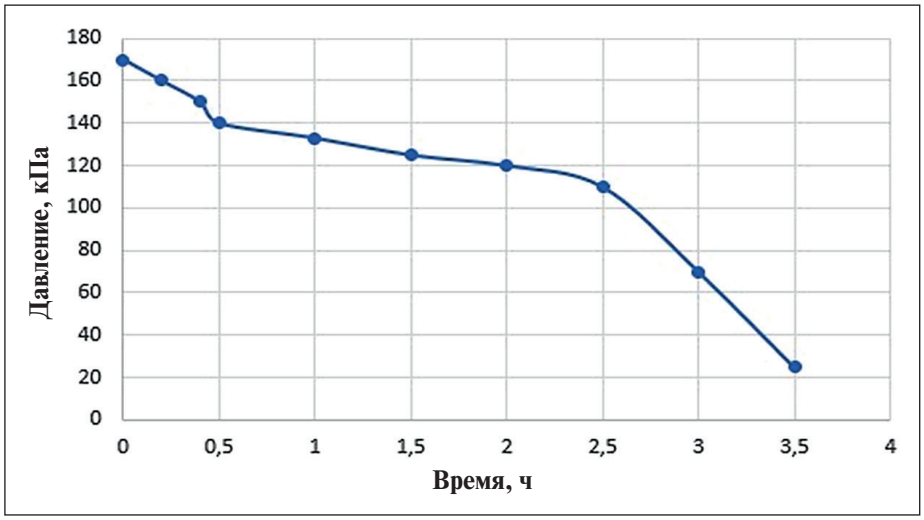

Рис. 1. **Изменение гидростатического давления цементного раствора во временном диапазоне после начала его кристаллизации.**

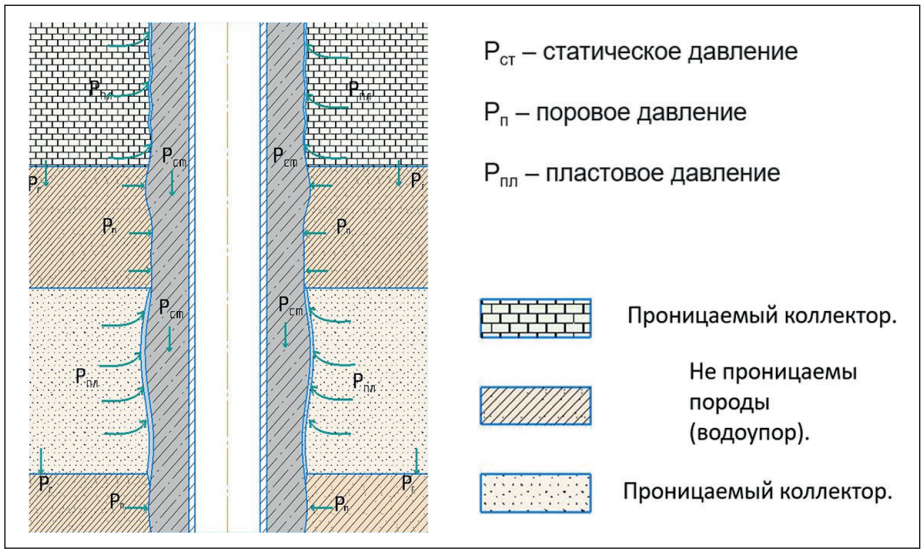

Рис. 2. **Формирование цементного камня в заколонном пространстве**

зованию микротрещин уже на контакте «обсадная труба-цементный камень». Таким образом, уже на стадии бурения и обустройства скважины в ее заколонном пространстве создаются условия для возникновения заколонных перетоков. С течением времени агрессивное воздействие пластовых фильтратов способствует выщелачиванию цементного камня и преобразованию микротрещин в полноценные трещины с постепенным разрушением цементного камня. Поскольку твердеющие тампонажные растворы на цементной основе используются во всех без исключения скважинах, то разрушение цементного камня в заколонном пространстве – явление закономерное и неизбежное. Срок возникновения заколонных перетоков зависит лишь от величин пластовых давлений вскрытых горизонтов, качества цементного раствора и технологии его доставки в заколонное пространство.

Зная, какие технологии изоляции заколонного пространства использовались при сооружении гидрогеологических скважин и скважин на твердые полезные ископаемые (особенно в постперестроечный период), можно однозначно утверждать, что эксплуатируемые более 10 лет скважины уже имеют заколонные перетоки. Единственное исключение – случай, когда в геологическом разрезе, вскрытом скважиной, присутствуют водочувствительные глинистые породы, которые при взаимодействии с водой набухают и заполняют пустоты, образующиеся в заколонном пространстве при разрушении цементного камня.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ликвидация скважин по типовым проектам

Большинство бесхозных скважин, предназначенных для ликвидации, имеет срок эксплуатации более 25 лет, т.е. все они имеют заколонные перетоки.

Чтобы официально ликвидировать скважину, необходимо разработать проектную документацию на ее ликвидацию [14], а для этого необходима исходная техническая информация о ней. Техническая документация на бесхозную скважину, как правило, отсутствует. Предпроектное обследование бесхозных скважин сводится к определению координат обнаруженного устья, визуальному осмотру выходящих на поверхность обсадных труб, замеру их диаметров и текущих глубин. Остальные параметры, необходимые для разработки проектных решений, можно попытаться найти в учетных карточках, которые хранятся в геологических фондах. Но не на все скважины удается найти эти карточки, а указанная в них информация не всегда совпадает с данными, полученными при визуальном осмотре скважины. Специальных работ по исследованию ствола скважины с целью определения фактической глубины и конструкции, как правило, не проводится до разработки проектных решений на ее ликвидацию. Поэтому исходные данные для разработки проектов на ликвидацию бесхозных скважин условны, как и сами проектные решения.

Единственный (и очень старый) нормативно-правовой акт, регламентирующий технические решения по ликвидации всех скважин (кроме скважин на нефть и газ) в целях *«...предотвращения загрязнения и засоления водоносных горизонтов через скважину, а также нежелательного смешения вод различного качества и истощения водоносных горизонтов при фонтанировании»* – это «Правила ликвидационного тампонажа буровых скважин различного назначения, засыпки горных выработок и заброшенных колодцев для предотвращения загрязнения и истощения подземных вод. 1967 г.» (далее – «Правила») [16]. Но и он ликвидацию скважины определяет как *«...заполнение ствола скважины (полный тампонаж) или части его (частичный тампонаж) цементом, глиной или другим водонепроницаемым материалом...»* [16]. И хотя Правила содержат разделы, посвященные ликвидации заколонных перетоков в скважинах с неизвлекаемыми обсадными трубами, используемые формулировки позволяют недобросовестным проектировщикам обосновать удобную для Заказчика технологию, чтобы сэкономить на ликвидации никому уже не нужных скважин. Ведь ликвидация одного только ствола бесхозной скважины на порядок дешевле по сравнению с полной ликвидацией скважины, включающей изоляцию затрубного пространства.

Технические решения на ликвидацию скважин по «типовому проекту» сводятся к:

- проработке ствола скважины и очистке его от мусора, который там скопился или был искусственно создан, от устья и до реального забоя;
- чистке стенок обсадных труб от коррозии и промывке всего ствола скважины после перечисленных операций;
- работам по дезинфекции водоносного горизонта с последующей засыпкой в перфорированную часть фильтровой колонны (в интервал водоносного горизонта) песчано-гравийной смеси;
- заполнению ствола скважины тампонажным материалом (как правило, цементным раствором);
- обустройству устья скважины, включая копку шурфа вокруг обсадной трубы (труб, если на поверхность входят более одной колонны); отрезание этих труб ниже уровня поверхности и заваривание обрезанной трубы (труб) металлической пластиной; возведение бетонной тумбы с соответствующей опознавательной табличкой [21].

Итоговым документом, фиксирующим ликвидацию бесхозной скважины, является акт, подпи-

санный участвующими в этом процессе сторонами, на основании которого передается информация по инстанциям о ликвидации источника загрязнения подземных вод.

Из описанной технологии очевидно, что проектные решения на ликвидацию бесхозных скважин, в которых присутствуют неизвлекаемые обсадные трубы, сводятся лишь к ликвидации их стволов. О необходимости изоляции заколонного пространства скважины в «типовых проектах» не упоминается, технические решения на устранение заколонных перетоков не разрабатываются, никаких работ в заколонном пространстве скважин не проводится.

П. 22 «Правил» гласит: *«Скважины, вскрывшие несколько водоносных горизонтов с различным химическим составом и с различными напорами подземных вод, тампонируются путем установки цементных мостов в интервалах водоупоров, которые разделяют водоносные пласты... Число цементных мостов равно числу водоносных горизонтов»* [16]. В природе, как известно, нет ничего одинакового, напоры подземных вод всегда различны, а значит, надо проектировать установку мостов во всех скважинах, вскрывших водоносные горизонты. Но именно этот п. 22 и используется для обоснования исключения работ по изоляции заколонного пространства при ликвидации скважин. Достаточно обосновать, опираясь на современные гидрогеологические исследования, что региональные водоупоры (условно) отсутствуют, а входящие в условно объединённый водоносный комплекс горизонты имеют схожие напоры и химический состав, и работы по устранению заколонных перетоков можно исключить из проектных решений. А если опираться не только на современные исследования, но и заглянуть в фондовые материалы (отчеты, составленные 50–60 лет назад), то оказывается, что те же самые водоносные горизонты, присутствующие в регионе, 50–60 лет назад имели не только водоупоры, но и разные статические уровни и химический состав воды [16]. Добавим к уже имеющейся информации количество скважин, пробуренных в этом регионе за те же 50–60 лет (включая и уже ликвидированные). Сравнение данных, полученных из фондовых материалов с современными исследованиями подземных вод, подтверждают, что объединение водоносных горизонтов происходит через пробуренные скважины. А значит, технические решения по устранению заколонных перетоков в скважинах при их ремонтах или ликвидации должны разрабатываться в проектах в обязательном порядке.

Не лишне будет напомнить, что отсутствие изоляции заколонного пространства в скважинах способствует поступлению в водоносные горизонты загрязняющих веществ не только из горизонтов, расположенных ниже по разрезу, но и с поверхности земли: при таянии снега, с дождевыми потоками [21]. А наличие заколонных водопроявлений (грифонов) в скважинах, вскрывших напорный горизонт, способствует изменению гидравлических параметров всех вышележащих проницаемых горизонтов, увеличивая уровни грунтовых вод и тем самым осложняя проведение строительных работ (например, г. Великие Луки, Псковской области) [20].

То, что может происходить (и происходит) с ликвидированными по «типовым проектам» скважинами в отдаленной перспективе, показано на рис. 3.

Ликвидация ствола скважины не устраняет поступление загрязняющих веществ в водоносные горизонты по заколонному пространству из источников загрязнения, расположенных как на глубине, так и на поверхности. Ликвидируется лишь один канал, по которому токсичные вещества проникают в водоносные горизонты. Основной же канал – заколонное пространство скважины – остается открытым и доступным для поступления загрязняющих веществ в подземные воды. При этом заколонное пространство скважин имеет тенденцию к увеличению в объеме за счет разрушения неустойчивых пород, слагающих стенки скважин (рис. 3) [21].

После подписания акта о ликвидации скважины участвующими в процессе сторонами скважина получает официальный статус ликвидированной, но при этом сохраняет способность перемещать загрязняющие вещества по заколонному пространству. Вероятность повторной ликвидации скважины нулевая, т.к. попасть в ствол скважины после его цементации можно только после удаления из него тампонажного материала (цементного камня), т.е. после его разбурки, но в старых скважинах это сопряжено с риском нарушения целостности обсадных труб [21].

Рис. 3. **Последствия ликвидации скважины по «типовому проекту»**

Итак, скважины, подлежащие ликвидации, но еще не ликвидированные, можно считать временными проводниками загрязняющих веществ, т.к. при благоприятном стечении обстоятельств они могут быть ликвидированы в полном объеме, т.е. с разобщением горизонтов в заколонном пространстве скважины. Пока скважина не ликвидирована, такая возможность сохраняется, пусть даже теоретически. Скважина, в которой по «типовому проекту» ликвидирован только ствол, т.е. внутреннее пространство обсадных труб, становится постоянным проводником загрязняющих веществ в подземные воды, т.е. каналы для миграции загрязняющих подземные воды веществ остались, и ликвидировать их уже не представляется возможным [21].

Таким образом, ликвидация скважин, в том числе и бесхозных, по «типовому проекту» вместо защиты подземных вод приводит к их дальнейшему постоянному и неустранимому загрязнению, но уже официально [21].

Как альтернатива «типовым проектам» на ликвидацию скважин, в том числе и бесхозных, предлагаются проектные решения, разработанные на основе технологии ликвидации изливающихся скважин с заколонными перетоками (грифонами), которая вот уже более 10 лет практикуется в Северо-Западном регионе [20]. Основу этой технологии составляет *наноматериал* «Тампонажная смесь ЛП», который очень хорошо себя зарекомендовал при ликвидации изливающихся скважин с заколонными перетоками. И только благодаря этому материалу появилась возможность осуществлять ремонт и ликвидацию скважин, вскрывших напорный водоносный горизонт на глубине менее 30 м.

«Тампонажная смесь ЛП» в исходном состоянии представляет собой вязкоупругую смесь, которая доставляется в зону источника водопроявления, заполняет поры и трещины вмещающих горных пород, кольматируя последние. Отличительной особенностью представляемого материала является его способность увеличиваться в объеме при контакте с водой, вытеснять воду из пор и трещин, заполняя собой освободившееся пространство. [19]. Кроме того, при попадании в водный поток (например, поток воды, движущийся в заколонном пространстве и имеющий разгрузку на устье скважины или в вышележащем проницаемом горизонте) однородная масса Тампонажной смеси ЛП разделяется на маленькие частички, которые устремляются по потоку в намытые каналы. Постепенно набухая и застревая в узких местах, а затем налипая друг на друга, частички Тампонажной смеси как бы вновь собираются в однородную массу и кольматируют каналы, по которым двигалась вода. Обладая хорошими адгезионными свойствами с металлом обсадных труб и с горными породами, «Тампонажная смеси ЛП» образует нетвердеющий, гидрофобный экран, препятствующий движению фильтрата в заколонном пространстве. Создаваемый экран способен выдерживать пластовые давления более 5 МПа [20]. Технологические свойства Тампонажной смеси позволяют ликвидировать и ремонтировать изливающиеся скважины с грифонами, вскрывшие напорные горизонты на глубине от 10 и более м. Тампонажный материал устойчив к динамическим нагрузкам и в случае возникновения последних (проседания грунта и пр.) способен самостоятельно заполнять вновь образующиеся пустоты и (или) трещины, кольматируя их. В заколонном пространстве создается пластичный непроницаемый гидрофобный экран, разобщающий водоносные горизонты.

За 10 лет существования технологии было отремонтировано и ликвидировано более 40 изливающихся скважин с заколонными перетоками, и практически во всех скважинах кровля напорного водоносного горизонта залегала на глубине до 50 м. Отрицательных результатов не было. Имеется опыт использования Тампонажных смесей ЛП в качестве изоляционного материала для обсадных труб на стадии строительства водозаборных скважинах, обустраиваемых на напорный водоносный горизонт.

В качестве демонстрации практического применения описанной выше технологии ограничимся лишь двумя примерами.

Ликвидация скважины в г. Белозерск, вскрывшей напорный горизонт на глубине 20 м, проводилась по описанной выше технологии с использованием «Тампонажной смеси ЛП». Поскольку устье скважины было утрачено в связи с интенсивным развитием воронки грифона, то для предотвращения суффозии и дальнейшего развития воронки последнюю засыпали гравием. А для доставки тампонажного материала в кровлю водоносного горизонта пришлось бурить вспомогательные скважины. На рис. 4–5 запечатлен момент максимального развития воронки и участок после проведенных работ по локализации водопроявления. [11]

2016 году на территории коттеджного поселка, расположенного в долине ручья Сетовка, при бурении разведочной скважины на воду (Полевой пер., 16) с глубины 9 м произошел излив воды с характерным запахом сероводорода, с дебитом 80 м^3/ч и статическим уровнем +15–17 м. Подрядчики, как это принято в подобных ситуациях, демонтировали установку и исчезли. В отличие от случая в г. Белозерске дебит скважины с течением времени уменьшался, и на момент начала ликвидации не превышал 25–30 м^3/ч. Кроме того, удалось сохранить устье скважины и своевременно засыпать воронку, образовавшуюся на устье скважины, гравием. Работы

Рис. 4. **Масштабы развития воронки грифона**

Рис. 5. **Участок после ликвидации скважины**

осложнялись небольшой глубиной скважины, однако технология, разработанная специалистами ООО «Геологический центр СПбГУ», и использование наноматериала «Тампонажная смесь ЛП» позволили ликвидировать водопроявления. На рис. 6–7 запечатлен момент начала водопроявления и территория участка после ликвидации скважины и ее обустройства [20].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для ликвидации бесхозных скважин в полном объеме, т.е. изоляции всех проводящих каналов, способствующих поступлению загрязняющих веществ в водоносные горизонты, связанных с конкретной скважиной, предлагается воспользоваться следующей технологией.

Так как в ликвидируемых бесхозных скважинах установлены обсадные трубы и извлечь их не представляется возможным, то для доставки тампонажного материала в затрубное пространство необходима предварительная перфорация обсадных колон выше кровли водоносного горизонта. Для их перфорации предлагается использовать труборезы, применяемые при ликвидации аварий в скважинах. Труборезы, по принципу своей работы, позволяют формировать окна по окружности обсадных труб. Просты в эксплуатации и в отличие от кумулятивных перфораторов не требуют специальных разрешений на их использование. Ширина формируемых окон определяется шириной резцов трубореза и находится в пределах 10–12 мм, что достаточно для доставки тампонажного материала ЛП в заколонное пространство. При необходимости количество технологических окон можно увеличить до двух или трех.

Тампонажный пакер на нагнетательной колонне (бурильных трубах ТБСУ) устанавливается в скважине выше технологического окна (если их несколько, то выше самого верхнего) на 200–300 мм и разжимается. Под пакером создается замкнутое пространство с выходом в затрубье через технологические отверстия.

Рис. 6. **Скважина на стадии ремонта, 2016 г.**

Рис. 7. **Участок после ликвидации скважины, 2021 г.**

Перед проведением изоляционных работ проводится испытание герметичности затрубного пространства давлением не более 1 МПа, по результатам которого принимается решение либо о проведении работ по изоляции заколонного пространства, при наличии заколонных перетоков, либо о демонтаже нагнетательного оборудования, в случае установления факта герметичности заколонного пространства.

Только после выполнения всего перечисленного комплекса работ должна осуществляться изоляция ствола скважины. А в качестве изоляционного материала для ликвидации каналов, созданных пробуренной скважиной в горном массиве, способствующих загрязнению подземных вод, технологией предписывается использование наноматериала «Тампонажная смесь ЛП».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Скважина, ликвидированная по «типовому проекту» [21], т.е. без устранения заколонных перетоков, продолжает оказывать негативное влияние на подземные воды.

2. При разработках проектных решений на ликвидацию скважин с неизвлекаемыми обсадными трубами должны предусматриваться мероприятия по устранению заколонных перетоков. А при их ликвидации заколонное пространство скважин должно изолироваться непроницаемым наноматериалом «Тампонажная смесь ЛП», что обеспечивает разобщение водоносных горизонтов в долгосрочной перспективе.

3. Необходимо пересмотреть и переработать нормативный документ «Правила ликвидационного тампонажа буровых скважин различного назначения, засыпки горных выработок и заброшенных колодцев для предотвращения загрязнения и истощения подземных вод. 1967 г.» и внести изменения в технологию ликвидации скважин с учетом современных инновационных технологий и опыта применения наноматериала «Тампонажная смесь ЛП» при ликвидации изливающихся скважин и грифонообразований.

4. На период работ по разработке и утверждению нового нормативного документа, определяющего технологию ликвидации скважин с обязательным устранением заколонных перетоков, необходимо приостановить работы по проектированию и ликвидации скважин, и в первую очередь, бесхозных.

5. Решение задачи экологической защиты буровых скважин основано на технологических инновациях университетских МИП: разработке изоляционных наноматериалов, способных эффективно решать проблемы загрязнения подземных вод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Управление инновациями и интеллектуальной собственностью фирмы / С.В. Валдайцев, О.В. Мотовилов, Н.В. Лукашов [и др.] ; Под редакцией доктора экономических наук, профессора О.В. Мотовилова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Проспект», 2018. 352 с. ISBN 978-5-392-27164-1. – EDN XYMAOT.

2. Поляков Н.А. Формирование стратегии развития малых инновационных предприятий СПбГУ / Н.А. Поляков // Устойчивое развитие: общество и экономика : Материалы III Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие: общество и экономика», Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2016 года / Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург: ООО «Скифия-принт», 2016. С. 522–523. – EDN WXNABZ.

3. Guzov Yu.N., Polyakov N.A., Titov V.O., Vashchuk A.E. Conditions for the Russian Federation Arctic zone innovative development. *E3S Web of Conferences International Conference on Efficient Production and Processing*, ICEPP 2020. Volume 161; 2020.

4. Экономика знаний: учебник / Н.В. Лукашов, Д.И. Артемова, О.Н. Кораблева [и др.]. Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Проспект», 2021. 368 с. ISBN 978-5-392-35117-6 – EDN COOWEC.

5. Агадулин И.И., Игнатьев В.Н., Сухоруков Р.Ю. «Экологические аспекты негерметичности заколонного пространства в скважинах различного назначения» // Нефтегазовое дело. 2011. № 4. С. 82–92.

6. Технология капитального и подземного ремонта нефтяных и газовых скважин: учеб, для вузов / Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. Краснодар: «Сов. Кубань», 2002. 584 с.

7. Башкатов Д.Н., Роговой В.Л. Бурение скважин на воду. Москва: Издательство «Колос», 1976 г. 206 с.

8. Булатов А. И. Тампонажные материалы : учебное пособие / А. И. Булатов. Москва: Недра, 1987. 280 с.

9. Вязовов Б.А. Проблема бесхозных скважин требует безотлагательного решения // Нефть и капитал. июль 2019. С. 1

10. Егорова Е.В. Крепление скважин. Анализ образования флюидопроявляющих каналов в зацементированном пространстве скважин и мероприятия по обеспечению качественной крепи / Е.В. Егорова, Т.С. Выборнова // Neftegaz. RU. 2017. № 2(62). С. 46–49. – EDN ZSMIPL.

11. Надёжен А. Укрощение «адской скважины» // LIVEJUORNAL. 19.06.2020. С. 1

12. Пискунов Е.Л., Леушева Е.Л. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия: Анализ причин появления заколонных перетоков» // Сборник докладов Всероссийской научно-технической

конференции с Международным участием, посвященной 60-летию кафедры бурения скважин. Издательство «Томского политехнического университета». 2014. С. 288–295.

13. Понизов А.В., Верещагин П.М., Чулков Н.В. и др. Условия, последствия и пути предотвращения заколонных перетоков жидкостей по стволам скважин на участках глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 2. С. 56–67.

14. Постановление Правительства РФ от 30 ноября 2021 № 2127 «О порядке подготовки, согласования и утверждения технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых, технических проектов строительства и эксплуатации подземных сооружений, технических проектов ликвидации и консервации горных выработок, буровых скважин и иных сооружений, связанных пользованием недрами, по видам полезных ископаемых и видам пользования недрами».

15. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 534.

16. Правила ликвидационного тампонажа буровых скважин различного назначения, засыпки горных выработок и заброшенных колодцев для предотвращения загрязнения и истощения подземных вод. Министерство геологии СССР от 14.09.1967.

17. Райкевич С.И. Межколонные давления и заколонные движения флюидов в скважинах. Пути решения проблемы // Труды международного технологического симпозиума «Интенсификация добычи нефти» / Институт нефтегазового бизнеса. М. 2003. С. 579–587.

18. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: издательство «Летопись», 2004. 664 с.

19. Трифаничев В.М. Инновационные технологии при создании противофильтрационных завес // Гидротехника. № 4 (17). 2009. С. 70–74.

20. Трифаничев В.М., Тудвачев А.В. Изливающие скважины: чем они опасны и что с этим делать // Справочник эколога. 2022. № 7. С. 54–63.

21. Трифаничев В.М. Ликвидация бесхозных скважин // Геология и недропользование. 2022. № 6 (10). С. 86–93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тудвачёв Алексей Викторович – генеральный директор ООО «Водный центр Санкт-Петербургского государственного университета», Санкт-Петербург, Россия, глава международной ассоциации гидрогеологов в РФ (IAH), эксперт «ГКЗ» Роснедра, эксперт ЕЭК ООН по подземным водам,

Гузов Ярослав Юрьевич – директор по развитию ООО «Геологический центр Санкт-Петербургского государственного университета», Санкт-Петербург, Россия,

Трифаничев Валерий Михайлович – главный инженер ООО «Геологический центр Санкт-Петербургского государственного университета», Санкт-Петербург, Россия,

Гузов Юрий Николаевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Учет, анализ и аудит», научный руководитель магистерской программы экономического факультета «Учет, анализ и аудит» Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия, член Общественного Совета Федерального казначейства РФ, https://orcid.org/0000-0002-5710-5300,

Поляков Николай Александрович – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики предприятия, предпринимательства и инноваций Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия, npregion@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4509-8913

ВКЛАД АВТОРОВ

Тудвачёв А.В. – идея, научное руководство; концепция исследования, развитие методологии.

Гузов Я.Ю. – сбор материала, обработка материала, написание статьи, составление итоговых выводов.

Трифаничев В.М. – идея, научное руководство, написание исходного текста статьи, развитие методологии, графическое и табличное представление результатов исследования, составление итоговых выводов, литературный обзор.

Гузов Ю.Н. – обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, составление итоговых выводов.

Поляков Н.А. – сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, составление итоговых выводов, литературный обзор.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 09.06.2024.

Review article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287

CC BY 4.0

The effectiveness of using fibre-reinforced concrete in underground construction: experience and prospects

Vladimir E. Rusanov[1], **Pavel S. Maslov**[2], **Vyacheslav A. Alekseev**[3*]

[1] OOO "SIC "Tunnel Association", Moscow, Russia
[2] OAO Severstal-metiz, Cherepovets, Vologda region, Russia
[3] REC "Underground Construction", National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: 634586@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the current state of the possibilities to improve the efficiency of construction processes by using fibre-reinforced concrete in the construction of transport and utility tunnels, as well as other critical building structures. The authors present foreign experience with widespread use of fibre-reinforced concrete in transport construction, as well as few such cases for domestic practice. The inconsistency of domestic experience with the modern state of art has been noted. The main blockers in the development of the issue are under consideration, the theoretical approach and practical application are presented. **Materials and methods.** The principal aspects of the current approach to the quality indicators of fibre-reinforced concrete and the classification principles of fibre-reinforced concrete based on quality criteria, which are the basis for the normalization of material characteristics, are described. The continuity of domestic and European regulatory documents is shown. **Results.** Illustrated examples of the possibilities of an optimization approach to the selection of structural solutions in the design of transport construction facilities used in international practice are described. **Conclusion.** The argumentation in favor of technology development is shown. This opens up possibilities for significant cost reduction justified by a scientific approach. In conclusion, the authors provide recommendations on the general application of the promising material in the domestic practice.

KEYWORDS: fibre-reinforced concrete, dispersed reinforced concretes, composite materials, high-strength concrete, calculation methods, stress-strain state, fibre, modified binders, tunnel, lining, load-bearing structures of underground construction facilities.

FOR CITATION:
Rusanov V.E., Maslov P.S., Alekseev V.A. The effectiveness of using fibre-reinforced concrete in underground construction: experience and prospects. *Nanotechnologies in construction.* 2024; 16(3): 276–287. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287. – EDN: FAEQWR.

INTRODUCTION

Modern construction has been constantly improving, materials and their properties are optimized, more modern technologies are used, a fundamental analysis allows us to apply more advanced methods of structural calculations. One of the development vectors combined with the latest achievements of science and technology is the wider use of composite materials such as fibre-reinforced concrete (FRC) [1, 2, 3]. These materials are a special type of concrete in the volume of which metal or polymer fibres of different geometries and characteristics [6, 7] can be distributed by the method of dispersed reinforcement [4, 5], i.e. the entire thickness of the concrete structure during construction will be permeated with fibres located in different directions and setting special properties of the material.

At the present time a large number of different types of fibres are used in fibre-reinforced concrete, the range of which is constantly increasing and the properties of already known fibres are being optimized [8]. The main materials for fibre used in the dispersed reinforcement of concrete include steel, glass, polymers (acrylic, aramid, nylon, polypropylene, etc.), ceramics, asbestos, carbon, and even natural fibres (wood, coconut, bamboo, etc.) [9].

However steel fibre is most often used in structural concretes that take the main load in buildings and constructions. Although studies have been conducted on the

© Rusanov V.E., Maslov P.S., Alekseev V.A., 2024

use of polymer fibres with characteristics close to steel [2, 8, 10]. Structural fibre should have increased strength to loads, have no shrinkage deformations and contribute to increased crack resistance and wear resistance.

From the point of view of properties for concretes of the most common classes B20–B40 the FRC is an effective substitute for standard reinforced concrete and allows to achieve the required physical and mechanical properties of concrete structures giving at the same time a number of positive properties:

- elimination of reinforcement work and reduction in construction costs;
- eduction to shrinkage;
- resistance to cracking;
- high tear and tensile strength comparable to reinforced concrete;
- increased modulus of elasticity;
- resistance to weathering influences and chemicals;
- high plasticity;
- impact resistance.

The use of FRC as load-bearing elements of precast and monolithic structures and sprayed shells in underground constructions looks especially promising.

It should also be noted that the properties of the final material – FRC – are significantly influenced by the characteristics of the binder and fillers used. On the basis of the Department of Technology of Binders and Concretes of the National Research University of MGSU the authors conducted tests on the modification of the binder for FRC with fillers having independent hydraulic activity and a high degree of dispersion (microparticles of selected mineral components with particle diameters d95 = 6 and 9 microns with a content of nanoparticles with average diameters of less than 0.1 microns to 10 and 5% respectively).

The introduction of micro- and nanoparticles with specified grain granulometric parameters allows filling the intergranular space of the standard Portland cement fraction granules with particles comparable in size to the volume of the formed pores, as well as contributing to the sealing of capillary pores. When selecting the composition of a composite binder, the maximum filling of the intergranular space with a micron filler in a given volume without exceeding it, with the exception of the effect of wedging large particles, should also be taken into account. The nanoparticles in the filler, in their turn, fill the smallest pores and contribute to the compaction of the cement paste structure at the micro level. When fibre is introduced into the modified concrete mixture, a more dense contact arrangement of the "fibre – cement stone – grains of inert aggregate" system occurs, which encourages a more active involvement of fibre work in the operation of the concrete structure during operation.

However, today there are no unambiguous regulatory documents prescribing the cost of materials to obtain a number of required characteristics of FRC, which is especially true for complex work structures such as the lining of underground constructions. Experiments on the selection of compounds and some experimental data have not been continued in the form of a completed document that allows designing fibre-reinforced concrete structures and establishing certain costs of the required components for it. One of the goals of the intended scientific research is to develop a regulatory framework for calculations and standard technological maps in order to obtain FRC, in particular for use in underground structures.

LLC Scientific and Engineering Center Tunnel Association and Scientific and educational Center Underground Construction of the National Research University (MGSU) undertake scientific research on the use of fibre-reinforced concrete in underground structures and have their own developments in the calculation and design of fibre-reinforced concrete structures, confirmed by construction and operation practices. In addition, it should be noted that global progress, constantly developing industry and the introduction of innovations in the chemical industry make it possible to increase dramatically the effectiveness of such technologies in the future.

THE SUBJECT OF THE STUDY

Tunnel linings constructed in a closed manner (circular and vaulted outlines) from the standpoint of structural mechanics are statically indeterminate structural systems operating overwhelmingly in conditions of off-center compression with predominance of compression stress. In such conditions, the strength and stress-strain properties of fibre-reinforced concrete (FRC) are realized most effectively due to their special characteristics.

Fibre-reinforced concrete structures are able to be loaded and resist deformation after the formation of cracks in them without brittle destruction, while the tensile strength of the FRC (marginal relative tensile deformations) can exceed the compressibility limit.

At the moment regulatory documents have been developed and are in force on the territory of the Russian Federation that allow you to design effective tunnel structures made from FRC: SP 297[1], SP 360[2], STO NOSTROY 2.27.125[3]. Moreover, there are regulatory guidance manuals, for example, "Guidelines for the design of concrete

[1] СП 297.1325800.2017 – Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017 год.

[2] СП 360.1325800.2017 – Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018 год.

[3] СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013 – Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ.

and reinforced concrete tunnel linings using composite materials", approved by the construction complex of the city of Moscow. Technical specifications and quality control requirements for heavy and fine-grained steel FRC are given in GOST R 59535[4]. The codes of Rules SP 360 and SP 297 are entered into the List of documents in the field of standardization, as a result of which, on a voluntary basis, compliance with the requirements of Federal Law No. 384-FZ dated December 30, 2009 "Technical Regulations on the safety of buildings and structures" is ensured. With all the possibilities, the use of fibre-reinforced concrete for load-bearing structures of transport, utility tunnels, as well as other critical building structures of urban infrastructure isn't widely spread in the domestic construction practice.

ANALYSIS OF APPLICATION EXPERIENCE AND DEVELOPMENT PROSPECTS IN THE RUSSIAN FEDERATION

FRC is used to a much greater extent in European countries where Spain [11, 12, 13], Italy [14, 15, 16, 17], Portugal [18], Great Britain, Germany [19, 20, 21, 22], Norway, Switzerland have the leading positions. Outside Europe, fibroblast is widely used in Australia [23, 24], Brazil, Peru, the USA [25, 26], Ecuador, and Japan. Recently. The use of FRC for the fastening of transport tunnels by shotcrete has become widespread in Turkey [27, 28].

The widespread use of FRC is due to the high level of scientific and technological progress in this field for the past twenty years. The state-of-the-art technology allows you to get significant advantages when using the material. The resistance to the transverse force in the structure increases to 57% depending on various parameters, while the crack opening width decreases to 70% with delayed crack formation in the area of action of the transverse forces [29].

According to the Bulletin of the International Tunnel Association for 2016 [30, 31], about 40 large projects were implemented in the Italian metro until 2016 only for the shield method of tunnel construction since the introduction of fibre-reinforced concrete in transport tunneling in 1982 (see Table 1). Lining structures with diameters from 4.8 to 14.3 m with reinforcement were used with only steel fibre in 58% of cases, with combined reinforcement "steel fibre + steel reinforcement" in 39% of cases. One project was implemented using polymer fibre reinforcement in combination with steel reinforcement.

The wide practice of using fibre-reinforced concrete also initiates the scientific and technical basis/arguments of the applied selected technical solutions. As a result of these works, it becomes possible to significantly reduce the costs and refine the calculation methods. For example, during the construction of the ninth metro line in Barcelona, a technical solution (65 kg of fibre per 1 m^3 of concrete), adopted on the basis of the calculation method fib Model Code 2010 [32], which looked effective, was refined according to the results of scientific work [33] with a decrease in the amount of fibre reinforcement to 45 kg/m^3.

The extensive experience of foreign colleagues demonstrates the technical and economic efficiency of fibre-reinforced concrete, especially in the tunnel construction industry, which is achieved by:

- reduction in labor costs for the manufacturing prefabricated linings of the shield method of work and monolithic linings of the mining method of work;
- increasing productivity (production speed with the in-line method) in the production of prefabricated blocks of linings for the shield method of work and reducing the manufacturing time for monolithic linings with the mining method of work;
- reduction in defect rate during production of prefabricated blocks, as well as their transportation and installation by a block loader.

To date, however, there has been no precedent in the domestic tunneling industry in using fibre-reinforced concrete tunnel linings at transport and even municipal facilities.

Fibre-reinforced concrete tunnel structures were applied in the framework of experimental metro sections in Moscow (fibre-reinforced shotcrete jacket of the distillation tunnel and lock blocks made of FRC) and St. Petersburg (3 rings of lining) [34, 35, 36, 37]. It is worth noting that at the time of the construction of the experimental sections, steel fibre was used, which, as of today, is not suitable for load-bearing structures operating under stress with off-center compression.

At the same time, it is noteworthy that the leadership in the use of FRC belongs to Russian engineers [38]. Vladimir Pavlovich Nekrasov at the beginning of the 20th century (1907–1909) studied and patented the composition of concrete reinforced with wire segments (1925 monograph "The method of indirect concrete armament").

The main problems of FRC implementation in underground construction and in particular for the construction of tunnel linings for various purposes are:

- the lack of a precedent for using FRC structures on real objects in the Russian Federation, and the presence of two or three experimental sites carried out in the 90s – 2000s does not provide correct information on the technical and economic efficiency of the material;

[4] ГОСТ Р 59535-2021 – Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021.

Table 1
International experience in the use of prefabricated SFRC linings for transport tunnels [30]

Tunnel Name	Year	Country	Function	D_{ex}, m	h, m	Fibre	Rebars
Metrosud	1982	Italy	Subway	6.40	0.30	Steel	No
Heathrow Express	1994	England	Railway	6.14	0.22	Steel	No
Napoli metro	1995	Italy	Subway	6.40	0.30	Steel	No
2nd Heinenoord	1999	Netherlands	Road	8.30	0.35	Steel	No
Jubilee Line Extension	1999	England	Subway	4.90	0.20	Steel	No
Essen	2001	Germany	Subway	8.00	0.35	Steel	No
Oënzberg tunnel	2003	Switzerland	Railway	11.40	0.30	Steel	No
Oënzberg-TBM	2003	Switzerland	Railway	12.20	0.40	Steel	Yes
Oënzberg-Shield	2003	Switzerland	Railway	12.20	0.40	Steel	No
Barcelona Metro Line 9 - Can Zam Stretch	2003	Spain	Subway	11.60	0.35	Steel	No
Channel Tunnel Rail Link (CTRL)	2004	Eng. - Fran.	Railway	7.90	0.35	Steel	No
Heathrow Express Extension (HexEx)	2005	England	Railway	6.14	0.22	Steel	No
Metropolitan Expressway CCSR tunnel	2005	Japan	Road	11.80	0.45	Steel	Yes
Barcelona Metro Line 9 - Stretch I	2006	Spain	Subway	9.04	0.32	Steel	Yes
Lötschberg	2007	Switzerland	Railway	4.94	0.22	Steel	No
Beacon Hill Tunnels	2007	USA	Road	7.30	0.30	Steel	No
Madrid Metro	2007	Spain	Subway	9.00	0.30	Steel	Yes
Line 1 of the Valencia Metro	2007	Spain	Subway	9.20	0.40	Steel	Yes
Heathrow - PiccEx	2008	England	Subway	4.80	0.15	Steel	No
Heathrow Express Ext. Tunnel to T5	2008	England	Railway	6.14	0.22	Steel	No
São Paulo Metro Line 4	2009	Brazil	Subway	9.10	0.35	Steel	No
Docklands Light Railway (DLR) Extension	2009	England	Railway	5.80	0.25	Steel	No
Malaga Rail Tunnel	2009	Spain	Railway	9.04	0.32	Synth.	Yes
The Clem Jones Tunnel - Clem 7	2010	Australia	Road	12.00	0.40	Steel	Yes
Extension of the FGC in Terrassa	2010	Spain	Railway	6.60	0.30	Steel	Yes
Keio line	2010	Japan	Railway	7.30	0.30	Steel	Yes
Metropolitan Expressway	2011	Japan	Road	14.30	0.45	Steel	Yes
Airport Link	2012	Australia	Road	12.20	0.40	Steel	No
Sagami Line	2012	Japan	Road	12.80	0.50	Steel	Yes
Koishikawa Kasen	2013	Japan	Railway	7.30	0.30	Steel	Yes
The Wehrhahn Line	2014	Germany	Subway	8.90	0.30	Steel	No
San Francisco Central Subway	2014	USA	Railway	5.96	0.28	Steel	Yes
Legacy Way	2015	Australia	Road	12.00	0.35	Steel	No
Metropolitan Expressway	2015	Japan	Road	13.10	0.40	Steel	Yes
Doha Metro Red North Line	2016	Qatar	Subway	6.77	0.30	Steel	No
Downtown Line 3	u.c.	Singapore	Subway	6.36	0.28	Steel	No
Thomson Line	u.c.	Singapore	Subway	6.36	0.28	Steel	No
Crossrail	u.c.	England	Railway	6.80	0.30	Steel	No
Brenner Base Tunnel	u.c.	Italy-Austria	Road	6.00	0.20	Steel	Yes

- poor awareness of design organizations and state evaluation bodies of the possibilities, prospects and conditions for the effective use of FRC, as well as the lack of methodological developments in the design and calculation of structures made of FRC;
- the lack of equipment of the reinforced concrete plants (dispensers, dispersants, special mixers), including absence of special equipment for testing fibre-reinforced concrete samples in quality control laboratories;
- the absence of accumulated statistics on testing of FRC samples in the Russian Federation for various classes of FRC; absence of practical base of lining designs in conjunction with FRC classes;
- the lack of specialized courses (lectures) on the FRC construction of underground structures and tunnels in universities.

Currently, structural fibre-reinforced concrete can be classified as follows:

- by type of concrete-matrix – made from concrete of normal strength (up to B60); high-strength concrete – HSC/HPC (B60-B100[150]); ultra-high-strength concrete – UHSC/UHPC (above B150);
- according to the type of fibre used – made of steel (wire with bends R > 1200 MPa); polymer (straight R > 800 MPa); a combination of microfibre and structural fibre;
- by the type of reinforcement in the structure – fibre of the same type; a combination of fibre of the same type and rod reinforcement without prestressing; fibre of two types (hybrid) and rod reinforcement without prestressing; fibre of two types (hybrid) and prestressed reinforcement;
- by the nature of the work with cracks – with softening (conventional FRC); with hardening (high fibre content in both normal strength FRC and HSC/HPC or UHSC/UHPC).

Therefore, in connection with the peculiarities of the nature of the work, the rationing of FRC by physical and mechanical characteristics is carried out in two classes – the concrete (matrix concrete) class in compressive strength B and the FRC class in residual tensile strength BF.

The class of FRC in terms of residual tensile strength BF is determined by testing samples-prisms with a cross section of 150×150 mm, a length of 550...600 mm with an incision in the center (see Fig. 1) either without incision, or round plates with diameter of 800 mm, thickness of 75 mm [39]. During the tests, the applied load and the opening width of the incision (in the case of a sample-a prism with an incision) or the deflection of the sample in the center (in the case of a sample-a prism without an incision and a round plate) are recorded.

A special aspect of the tests is the use of special servo–hydraulic equipment for loading and monitoring deformations of samples, which has an almost instantaneous response to changes in the stiffness of the sample due to the formation of micro and macro cracks, which allows you to record the descending sections (the softening stage) in the Load-Strain graphs.

The diagram (Fig. 2) shows the test results of incised prism samples, while the concentrated load scale F is re-

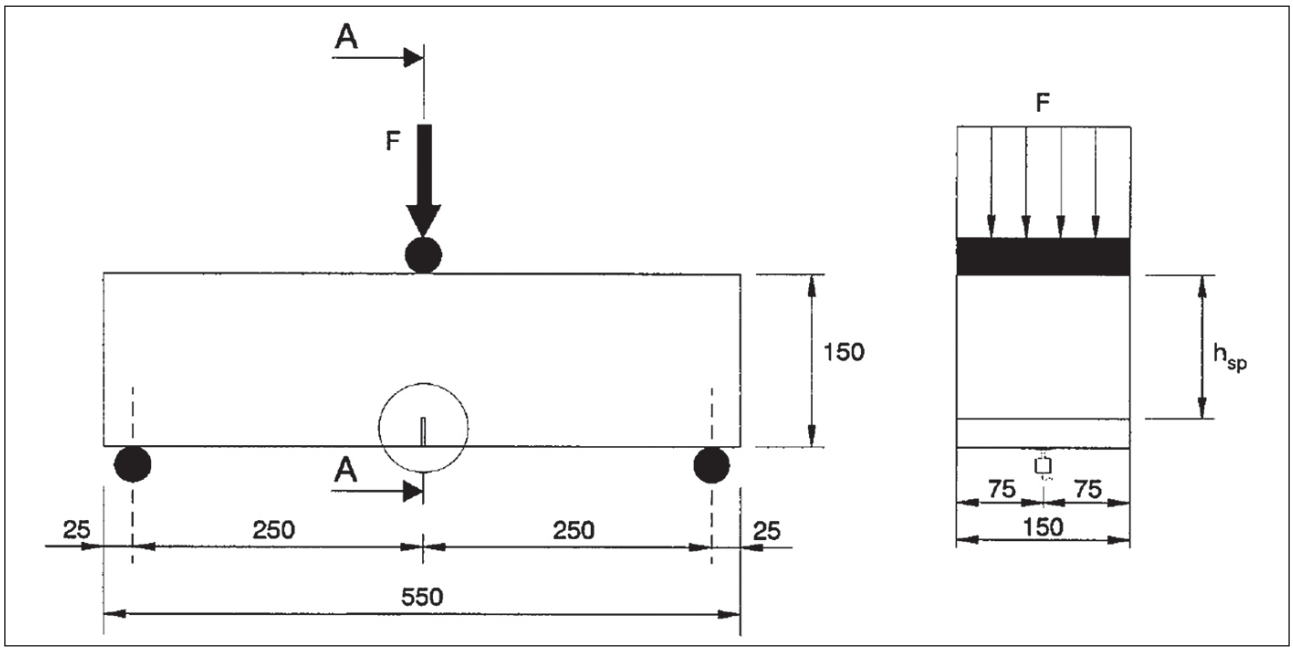

Fig. 1. **Example of a test scheme for a prism sample with an incision to determine the class of FRC in terms of residual tensile strength BF**

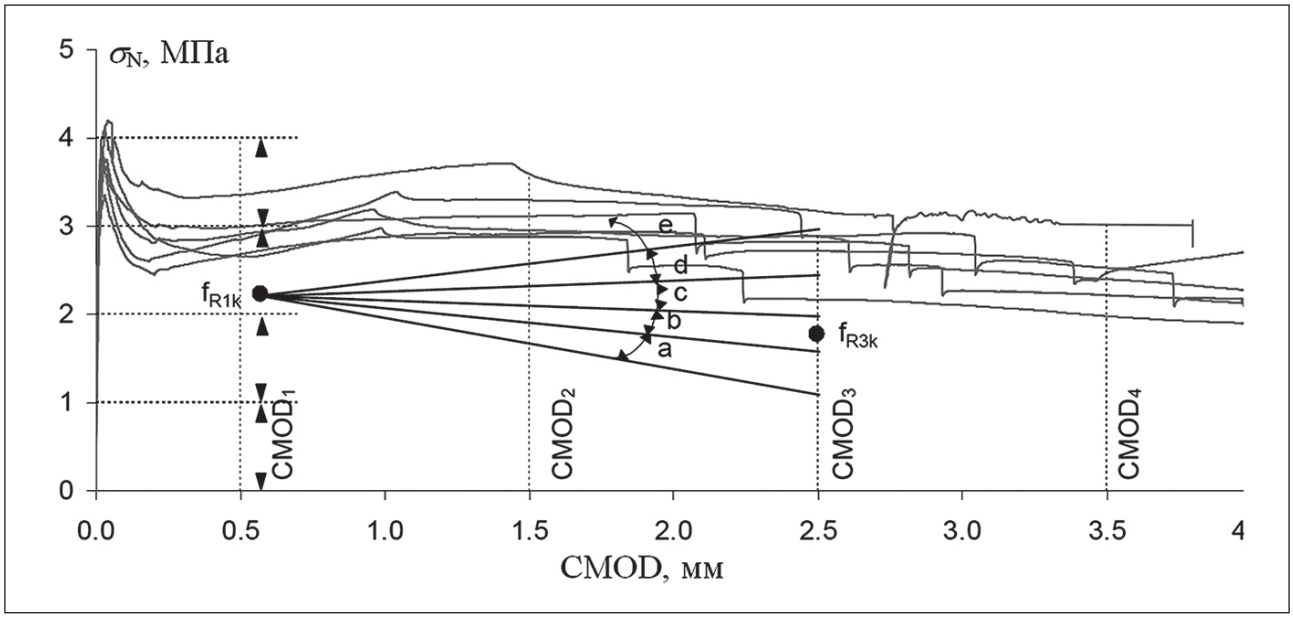

Fig. 2. **Scheme for determining the class of FRC by residual tensile strength BF based on test results of samples-prisms with an incision**

placed by the normal stress scale in the central section of the sample σN, the CMOD scale (Crack Mouth Opening Displacement) indicates linear deformations of the incision lower edge of the sample (modeling crack growth). The strength corresponding to a small deformation (the second group of limiting states) at CMOD1 = 0.5 mm is indicated in the diagram as fR1. The strength corresponding to the limit deformations (the first group of limit states) at CMOD3 = 2.5 mm is indicated in the diagram as fR3. Two indicators are used to normalize the FRC class in terms of residual tensile strength BF: fR1, which is recorded in the designation with a number rounded down to the nearest normalized class; the ratio fR3/ fR1 with range ranking and designation in Latin letters:

a – at $0{,}5 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 0{,}7$;
b – at $0{,}7 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 0{,}9$;
c – at $0{,}9 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 1{,}1$;
d – at $1{,}1 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 1{,}3$;
e – at $1{,}3 \leqslant f_{R3}/f_{R1}$.

For example, in the diagram in Fig. 2, for the designated points fR1 and fR3, the class of FRC in terms of residual tensile strength should be written as BF2.0b (taking into account statistical processing of test results for fR1 and fR3).

It should be noted that in SP 297, SP 360, with the concept of European regulatory documents adopted by the authors of the Joint Venture regarding the classification of fibre-reinforced concrete, a typo was made in the letter designation of the fR3/fR1 ratio ranges.

Thus, the full designation of the FRC class (without specifying the brands for water resistance and frost resistance) looks, for example, as follows:

SFRC B40 BF3.0b is a steel fibre-reinforced concrete based on concrete B40 with a class of fibre-reinforced concrete in terms of residual tensile strength BF3.0b;

PFRC B40 BF3.0b is a fibre-reinforced concrete based on concrete B40 and polymer fibre, with a class of fibre-reinforced concrete in terms of residual tensile strength BF3.0b.

The advantage of this classification of FRC is the clearly defined physical and mechanical characteristics of FRC (before its manufacture) for a certain class, which can be selected during the design and calculation of the FRC structure. In this case, designers do not need to decide what type and dosage of fibre will be required to achieve the calculated class of FRC, similar to the situation when designers do not ask themselves what kind of crushed stone and sand must be used to obtain concrete of a particular class.

Each class of FRC in terms of residual tensile strength BF will correspond to a state diagram (material deformation diagram) (see Fig. 3, 4), which can be constructed according to normalized strength and deformation parameters (Table 2).

Thus, when developing a statistical database for testing fibre-reinforced concrete samples (in the conditions of the Russian Federation), manufacturers of fibre-reinforced concrete structures will understand which fibre and how much of it is required to provide a particular class of fibre-reinforced concrete.

In the world practice of using fibre-reinforced concrete in tunneling and other areas of construction the following areas are actively developed:

- production of lightweight tunnel lining structures (reduction in the thickness of lining)[40];

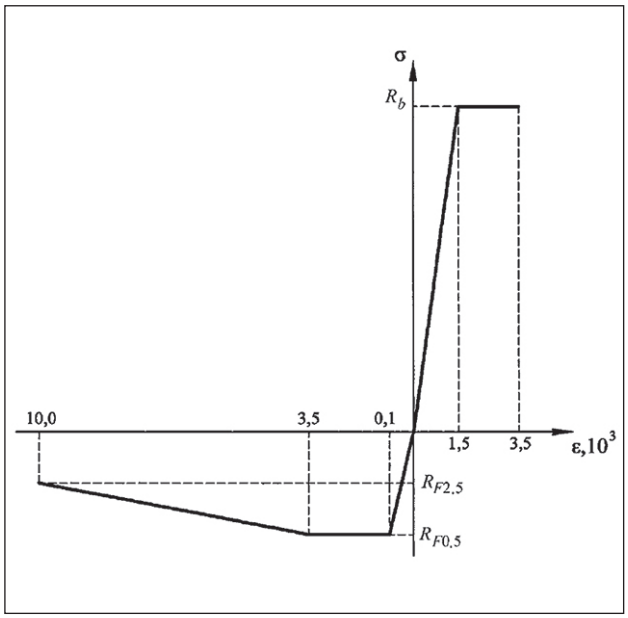

Fig. 3. **Example of a diagram of the stress-strain state of FRC (STO NOSTROY 2.27.125-2013)**

- reduction or elimination/exclusion of bar/core reinforcement for precast/prefabricated and monolithic linings (significant reduction or complete exclusion of the main longitudinal reinforcement, transverse reinforcement, exclusion of structural reinforcement) [41, 42];
- production of high-strength and ultra-high-strength FRC structures (hybrid FRC using two types of fibre – microfibre and structural fibre) [43, 44];
- production of bending structures (beams, slabs of large spans) [42];
- studies on the stress state of the elements in fibre-reinforced concrete structures working on torsion [45];
- research and development of effective anchoring devices for steel wire fibre;
- development of methods and techniques of fibre orientation in structures in order to increase the effectiveness of reinforcement [46];
- development of new and improvement of existing methods of FRC structures quality control;
- improvement of FRC test methods for samples in order to reduce the percentage of rejection, decrease the

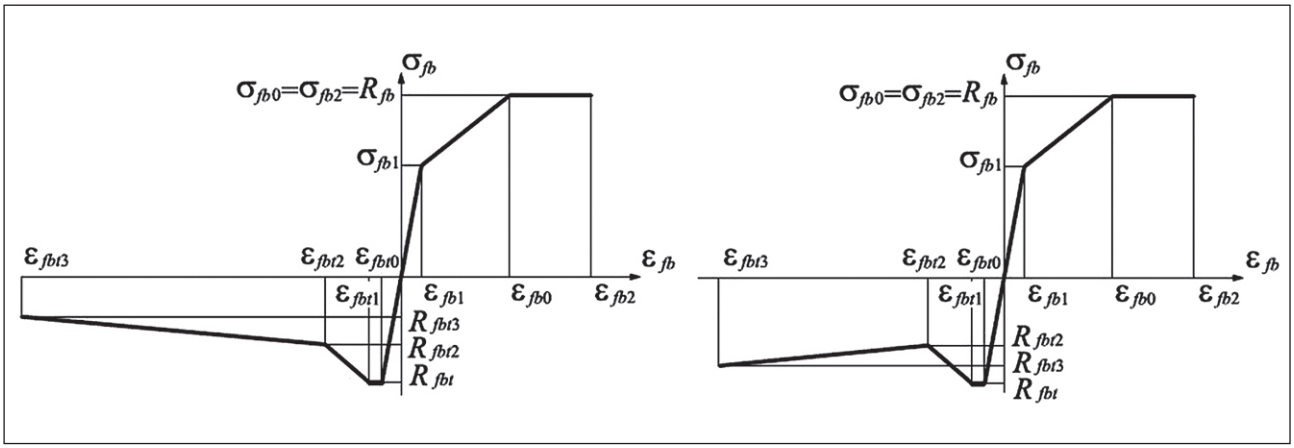

Fig. 4. **Example of a diagram of the stress-strain state of FRC (SP 360.1325800.2017)**

Table 2

Values of regulatory resistances (Table 5.2.1. STO NOSTROY 2.27.125-2013)

B_F		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$R_{F0.5,n}$ и $R_{F0.5,ser}$		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
$R_{F2.5,n}$ и $R_{F2.5,ser}$	*a*	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00
	b	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	3,50	3,85	4,20	4,55	4,90	5,25	5,60
	c	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,50	4,95	5,40	5,85	6,30	6,75	7,20
	d	0,55	1,10	1,65	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	5,50	6,05	6,60	7,15	7,70	8,25	8,80
	e	0,65	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20	5,85	6,50	7,15	7,80	8,45	9,10	9,75	10,40
$R_{F0.5}$		0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00	4,33	4,67	5,00	5,33
$R_{F2.5}$	*a*	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,33	2,50	2,67
	b	0,23	0,47	0,70	0,93	1,17	1,40	1,63	1,87	2,10	2,33	2,57	2,80	3,03	3,27	3,50	3,73
	c	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	4,80
	d	0,37	0,73	1,10	1,47	1,83	2,20	2,57	2,93	3,30	3,67	4,03	4,40	4,77	5,13	5,50	5,87
	e	0,43	0,87	1,30	1,73	2,17	2,60	3,03	3,47	3,90	4,33	4,77	5,20	5,63	6,07	6,50	6,93

coefficient of variation, and improve measurement accuracy [47].

As illustrative examples of the implementation of research results in transport tunnels, the experience of Spanish [41] and Italian [42] specialists in the "optimization" of reinforcement in prefabricated and monolithic tunnel linings should be noted (see Fig. 5, 6).

In the case shown in Fig. 5, there is a prefabricated lining of a subway running tunnel in Spain. In the basic version of traditional reinforcement, the amount of rebars was approximately 150 kg/m^3. The engineers offered to use fibre-reinforced concrete based on class B45 concrete and steel wire fibre in an amount of 45 kg/m^3 together with rebars made of non-metallic reinforcement arranged locally along the transverse/annular and longitudinal/radial faces of the blocks to perceive the thrust forces from the jacks during shield moving and perception compressive stresses formed in blocks from rock pressure (longitudinal/radial faces).

The proposed technical solution made it possible to eliminate the use of steel reinforcement with a simplification of the shape of the core frames and by reducing financial costs and labor resources in the manufacture of rebar frames, achieve savings of up to 12% in the production of blocks.

In the case shown in Fig. 6, there is a monolithic lining of a road tunnel in Turin (Italy). The basic version assumed the conventional reinforcement of the lining with discrete rebars, which is a labor intensive process at the stage of a monolithic lining construction. After the feasibility study/calculated justification of the "optimized" reinforcement, a solution was proposed to exclude core reinforcement from the arch and walls of the tunnel to the stress concentration zone at the corners of the wall interface with the reverse arch, as well as to exclude the core reinforcement in the middle third of the reverse arch of the lining.

It is offered to implement the remaining core reinforcement in areas with a concentration of tensile stresses in the form of flat frames, which can be prepared on the construction site and delivered for installation in a tunnel to the reinforcement site in order to minimize labor costs and terms of construction.

The results achieved in the implementation of this technical solution are as follows: 30% reduction in the number of fittings as a whole (in total by weight of steel – reinforcement + fibre); 75% reduction in core reinforcement; significant simplification of reinforcement; elimination of the most labor-intensive process of the arch reinforcement; reduction in the construction period of the tunnel.

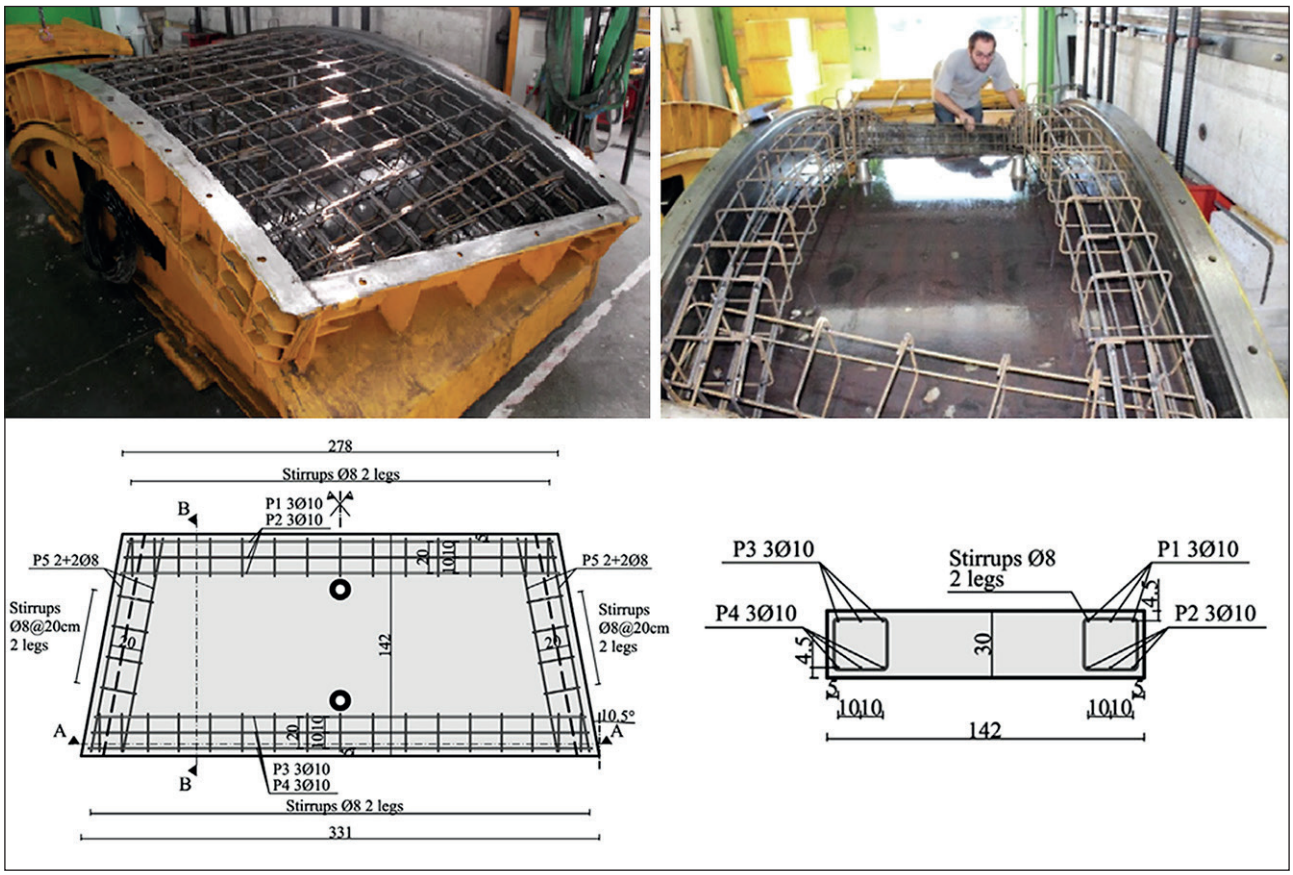

Fig. 5. **The experience of "optimizing" the reinforcement of the segmental lining (Spain)**

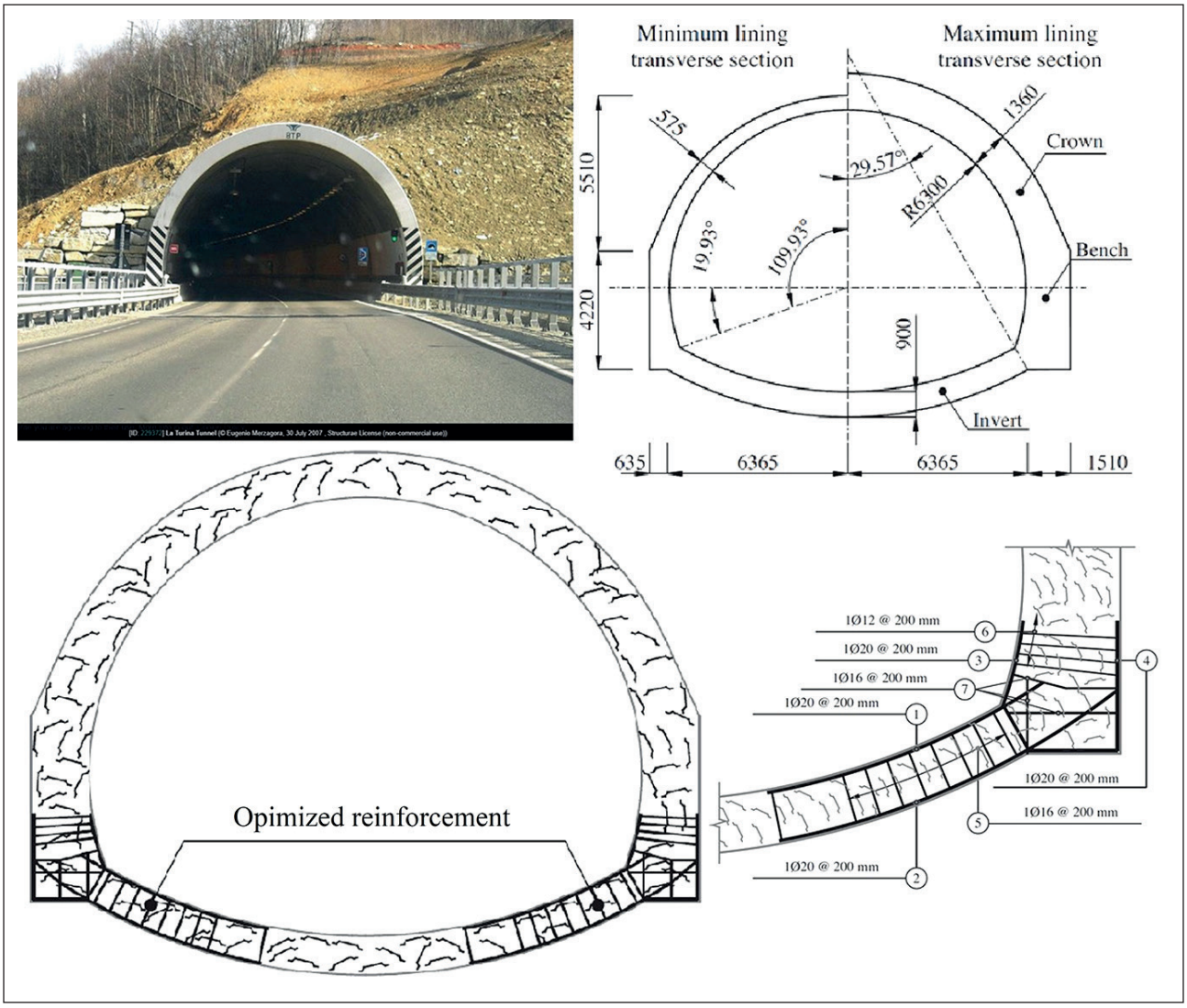

Fig. 6. **The experience of "optimizing" the reinforcement of the prefabricated lining (Italy)**

CONCLUSIONS

As the main conclusions, it should be noted:

- currently, in the conditions of the Russian Federation, there are no obstacles to design and produce FRC structures for tunnels and underground structures;
- steel fibre manufacturers are ready to supply the production with enough amount of fibre;
- the introduction of fibre-reinforced concrete in Russian conditions is hindered by the "fear of the new", little experience in working with FRC, poorly developed production technology of FRC structures and their quality control;
- reinforced concrete plants need to invest in re-equipment for the FRC structures production – automatic dispensers integrated into the technological process;
- laboratories need special testing equipment with servo hydraulics for quality control;
- when using fibre-reinforced concrete structures, the expected effect is mainly associated with a reduction in labor costs for the manufacturing the reinforcement products and reaches: 5...20% for prefabricated FRC linings of the shield method; 10...30% for monolithic FRC linings of the mining method, as well as fibre-reinforced shotcrete supports and primary linings.

REFERENCES

1. Ige Samuel Ayeni, Jamaludin Mohamad Yatim, Nor Hasanah. A review of hybridised use of fibres in shear behaviour of fibre-reinforced concrete beams. ASEAN Engineering Journal. 2024. https://doi.org/10.11113/aej.V14.20314

2. Kotha Hima Bindu, Mudigonda Rathna Chary, Jagadish Shrisaila Haranatti. Behavior of High Strength Reinforced Cement Concrete with Polypropylene and Steel Fibres.MATEC Web of Conferences 392. March 2024. https://doi.org/10.1051/matecconf/202439201011

3. R. Lal, Surender Kumar Verma, Chander Sheikhar Singla. Fibre Reinforced Concrete: An Overview.Conference: International Conference on Emerging Trends in Engineering Innovations and Technology Management (ICET: EITM-2017) NIT Hamirpur, India. December 16–18. 2017.

4. Rui Valente, Mário Pimentel. Fibre reinforced concrete under in-plane shear stresses. Engineering Structures. 2024; 307: 117890. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117890

5. Charankumar Ashok Kamble. Strength properties of hybrid fibre reinforced concrete using fly ash. Interantional journal of scientific research in engineering and management . 2023; 07(09). https://doi.org/10.55041/IJSREM25834

6. Yazhini Ezhilarasan, R. Chithra. Performance study of fibre reinforced functionally graded concrete pipes. Construction and Building Materials. 2022; 344(1):128224. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128224

7. Florence More, Senthil Selvan. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. Buildings. 2022; 12(9):1436. https://doi.org/10.3390/buildings12091436

8. Salahaldein Alsadey, Miftah Abdallateef, Muftah Mohamed, Abdalrhman Milad. Investigating Behaviour of Reinforced Concrete with Glass Fibre. Jurnal Kejuruteraan 2021; 33(3):559-577. https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(3)-16

9. Libo Yan, Nawawi Chouw. A comparative study of steel reinforced concrete and flax fibre reinforced polymer tube confined coconut fibre reinforced concrete beams. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013; 32 (16):1155–1164. https://doi.org/10.1177/0731684413487092

10. Abdullah O. Baarimah, Sharifah Maszura Syed Mohsin. Mechanical properties of steel/kenaf (hybrid) fibers added into concrete mixtures /IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018; 342(1):012075. https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012075

11. de la Fuente A., Lin L., Cavalaro S.H.P., Aguado de Cea A. Fibre reinforced precast concrete segments: design and applications. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.

12. Liao L., de la Fuente A., Cavalaro S., Aguado A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. Tunnelling and Underground Space Technology. 2015; 47: 200-210.

13. Serna P., Llano-Torre A., Martí-Vargas J., Navarro-Gregori J. Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB) in 2020.

14. di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. Materials and Structures. 2009; 42:1261–1281. https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4

15. di Prisco M., Tomba S., Bonalumi P., Meda A. On the use of macro synthetic fibres in precast tunnel segments. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly May 22–28, 2015. Lacroma Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia.

16. di Prisco M., Colombo M., Dozio D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. Structural Concrete. 2013. 14: 4. https://doi.org/10.1002/suco.201300021

17. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Romualdi P. Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. Tunnelling and Underground Space Technology. 2011; 26: 284-291.

18. Barros J. Recent developments on the analysis and design of fibre reinforced concrete structures. 14th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", 5–6 October 2023. Lithuania.

19. Winterberg R. Use of macro synthetic fibre in segmental tunnels. BEFIB2021, 096. v3.

20. Plückelmann S., Breitenbücher R., Smarslik M., Mark P. Aufnehmbare Teilflächenspannung von hochfestem. Stahlfaserbeton Beton- und Stahlbetonbau 2019. 114: Heft 9.

21. Hansel D., Guirguis P. Stahlfaserbeton-Tübbinge: Stand der Technik und realisierte Projekte (Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects). Tunnel. 2011; 1.

22. Smarslik M., Mark P. Hybrid reinforcement design of longitudinal joints for segmental concrete linings. Structural Concrete. 2019; 1–15. https://doi.org/10.1002/suco.201900081

23. Bernard E.S., Thomas A.H. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. Tunnelling and Underground Space Technology. 99 (2020) 103302.

24. Bernard E.S., Clements M.J.K, Duffield S.B., Morgan D.R. Development of Macro-synthetic Fibre Reinforced Shotcrete in Australia. In: Seventh International Symposium on Sprayed Concrete for Underground Use, June 16–19, Sandefjord, Norway. 2014; 67–75.

25. El-Helou R., Graybeal B. Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams. Structural Engineering Journa. 2022.

26. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. PUBLICATION NO. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013.

27. Eryiğit H., Sayin A., Kocak B. An overview of the construction of turkey's longest road tunnel focusing on ground support using macro synthetic fibers as shotcrete reinforcement. Engineering, Environmental Science. 2014.

28. Namli M. Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects. Underground Space 2021; 6 (6): 732-750.

29. Abbood I., Faleh Al-Bayati A. Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete flat slabs: a literature review and design codes evaluation, Kerbala, Iraq, 2021.

30. Twenty years of FRC tunnel segments practice: lessons learnt and proposed design principles / ITA Report #16 / ISBN : 978-2-970 1013-5-2. April, 2016.

31. Design guidance for precast fibre reinforced concrete segments / ITAtech Report #7 / ISBN: 978-2-9701013-2-1/ April, 2016.

32. fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013 / ISBN:9783433030615 / https://doi.org/10.1002/9783433604090

33. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010 / Tunneling and Underground Space Technology, № 47, p. 200–210, 2015.

34. Matveev G., Kagan M. Key segments made of SFRC // Metrostroy. 1981. № 2. p. 10.

35. Kagan M. Density of segment reinforced by steel fibre // Metrostroy. 1985. № 1. pp. 29-30.

36. Cyvian B. Steel Fibre Reinforced Concrete linings // Metrostroy. 1986. № 4. pp. 30–31, № 6. pp. 29–32.

37. Kagan M. Comparison of the actual compressive strength of concrete and steel fibre reinforced concrete segments // Metrostroy. 1987. № 3. pp. 19–22.

38. Nekrasov V.P. The method of indirect reinforcing of concrete. M.: NKPS Transpechat, 1925.

39. ASTM C 1550. Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).

40. Trabucchi I., Smarslik M., Tiberti G., Petraroia D.N., Plizzari G.A., Mark P. A hybrid solution proposal for precast tunnel segments. Structural Concrete. 2021;1–15. https://doi.org/10.1002/suco.202000629

41. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., De Rivaz B., Giamundo N. Experimental Behaviour of Precast Tunnel Segments in Steel Fiber Reinforcement with GFRP Rebars. FRC2018: Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications Joint ACI-fib-RILEM International Workshop.

42. Tiberti G., Minelli F., Plizzari P. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. Composites. Part B 58. 2014; 199–207.

43. Tengilimoglua O., Akyuzb U. Experimental study on hybrid precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibres and glass fibre reinforced polymer bars. Tunnelling and Underground Space Technology 2020; 106.

44. Conforti A., Trabucchi I., Tiberti G., Plizzari G., Caratelli A., Meda A. Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers. Engineering Structures. 2019; 199: 109628, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109628

45. Facconi L., Amin A., Minelli F., Plizzari G. A unified approach for determining the strength of Frc members subjected to torsion—Part I: Experimental investigation. Structural Concrete.2021; 1–17. https://doi.org/10.1002/suco.202100161

46. Medeghini F., Guhathakurta J., Tiberti G., Simon S., Plizzari G., Mark P. Steered fiber orientation: correlating orientation and residual tensile strength parameters of SFRC. Materials and Structures. 2022; 55:251. https://doi.org/10.1617/s11527-022-02082-9

47. Carmona S., Molins C., García S. Application of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of FRS in underground mining works. Construction and Building Materials 2020; 246.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. Rusanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, General Director of NIC Tunnel Association LLC, Moscow, Russia, rusanov.ve@nizta.ru, https://orcid.org/0000-0002-8199-7214

Pavel S. Maslov – Head of the Steel Fibre Division of Severstal-Metiz OJSC, Cherepovets, Vologda Region, ps.maslov@severstalmetiz.com, https://orcid.org/0009-0005-0241-8712

Vyacheslav A. Alekseev - Director of the Research Center "Underground Construction", National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, 634586@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2705-5354

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

V.E. Rusanov – scientific guidance, research concept; writing the original text.

P.S. Maslov – the concept of research, writing the original text.

V.A. Alekseev – scientific guidance, final conclusions, writing the original text

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 29.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

Обзорная статья
УДК 624.1
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287

CC BY 4.0

Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы

Владимир Евгеньевич Русанов[1], **Павел Сергеевич Маслов**[2], **Вячеслав Александрович Алексеев**[3*]

[1] ООО «НИЦ «Тоннельной ассоциации», Москва, Россия
[2] ОАО «Северсталь-метиз», Череповец, Вологодская область, Россия
[3] НОЦ «Подземное строительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: 634586@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается актуальное состояние возможностей повышения эффективности строительных процессов с помощью применения фибробетонов при строительстве транспортных и коммунальных тоннелей, а также других ответственных сооружений. Авторами представлен зарубежный опыт широкого применения фибробетонов в транспортном строительстве, также приводятся малочисленные случаи применения фибробетонов в отечественной практике, отмечается несоответствие отечественного опыта современному уровню техники. Приводятся основные блокираторы развития рассматриваемого вопроса, проблематика теоретического подхода и практического применения. **Материалы и методы.** Изложены принципиальные аспекты современного подхода к определению показателей качества фибробетонов и принципы классификации фибробетонов по качественному признаку, положенные в основу нормирования характеристик материала. Показана преемственность отечественных и европейских нормативных документов. **Результаты.** Описываются иллюстрированные примеры возможностей оптимизационного подхода к выбору конструктивных решений при проектировании транспортных сооружений, применяющиеся в зарубежной практике. **Заключение.** Показана аргументация в пользу развития технологии, открывающая возможности для значительного сокращения затрат, обоснованных научным подходом. В заключение авторы приводят рекомендации по основным направлениям практического развития перспективного использования материала в отечественной практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, дисперсно-армированные бетоны, композиционные материалы, высокопрочный бетон, методы расчёта, напряженно-деформированное состояние, фибра, модифицированные вяжущие, тоннель, обделка, несущие конструкции подземных сооружений.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А. Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 276–287. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-16-3-276-287. – EDN. FAEQWR.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство постоянно совершенствуется, оптимизируются материалы и их свойства, используются более современные технологии, фундаментальный анализ позволяет применять более прогрессивные методы расчетов конструкций. Одним из векторов развития в совокупности с последними достижениями науки и техники является более широкое применение композиционных материалов, например, таких, как фибробетоны [0, 12, 13]. Подобные материалы представляют собой особый тип бетона, в объеме которого методом дисперсного армирования [4, 5] могут распределяться металлические или полимерные волокна разной геометрии и характеристик [6, 7], т.е. вся толща бетонной конструкции при строительстве будет пронизана волокнами, распо-

© Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А., 2024

лагающимися в разных направлениях и задающих особые свойства материала.

В настоящее время в фибробетонах применяется большое количество разных видов фибр, номенклатура которых постоянно расширяется, свойства уже известных фиброволокон оптимизируются [8]. К основным материалам для фибры, используемой в дисперсном армировании бетонов, относятся сталь, стекло, полимеры (акрил, арамид, нейлон, полипропилен и др.), керамика, асбест, углерод и даже природные волокна (дерево, кокосовый орех, бамбук и др.) [9].

Однако в конструкционных бетонах, которые воспринимают основную нагрузку в зданиях и сооружениях, используется чаще всего стальная фибра, хотя ведутся исследования по использованию полимерных фиброволокон с характеристиками, близкими к стальной [2, 8, 10]. Конструкционная фибра должна обладать повышенной прочностью к нагрузкам, не иметь усадочных деформаций и способствовать повышенной трещиностойкости и износостойкости.

С точки зрения свойств для бетонов наиболее распространенных классов В20–В40 фибробетон является эффективной заменой стандартному железобетону и позволяет добиваться требуемых физико-механических свойств бетонных конструкций, при этом придавая ряд положительных свойств:

- исключение арматурных работ и снижение затрат на строительство;
- снижение усадки;
- устойчивость к трещинообразованию;
- высокую прочность на разрыв и растяжение, сравнимую с армированным железобетоном;
- повышенный модуль упругости;
- устойчивость к атмосферным воздействиям и химическим веществам;
- высокую пластичность;
- ударопрочность.

Особенно перспективно выглядит использование фибробетона в подземных конструкциях в качестве несущих элементов сборных и монолитных конструкций, набрызгбетонируемых оболочек.

Также следует отметить, что на свойства конечного материала – фибробетона – значительно влияют характеристики используемого вяжущего вещества и наполнителей. Авторами на базе кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов НИУ МГСУ проводились испытания по модификации вяжущего для фибробетонов наполнителями, имеющими самостоятельную гидравлическую активность и высокую степень дисперсности (микрочастицы подобранных минеральных компонентов с диаметрами частиц d95 = 6 и 9 мкм с содержанием наночастиц, имеющих средние диаметры менее 0,1 мкм до 10 и 5% соответственно). Внедрение микро- и наночастиц с заданными гранулометрическими параметрами зерен позволяет заполнять межзерновое пространство гранул стандартной фракции портландцемента частицами с размерами, сравнимыми с объемом образованных пор, а также способствующих уплотнению капиллярных пор. При подборе состава композиционного вяжущего также должно учитываться максимальное заполнение межзернового пространства микронаполнителем в заданном объеме без его превышения с исключением эффекта расклинивания крупных частиц. Содержащиеся в наполнителе наночастицы, в свою очередь, заполняют самые мелкие поры и способствуют уплотнению структуры цементного теста на микроуровне. При введении в модифицированную бетонную смесь фибры происходит более плотное контактное расположение системы «фибра – цементный камень – зерна инертного заполнителя», способствующее более активному вовлечению работы фибры в работу бетонной конструкции при эксплуатации.

Однако на сегодняшний день отсутствуют однозначные нормативные документы, назначающие расходы материалов для получения ряда требуемых характеристик фибробетона, что особенно важно при сложной работе конструкций, как, например, в обделке подземных сооружений. Опыты подбора составов и некоторые экспериментальные данные не получили продолжения в виде законченного документа, позволяющего проектировать фибробетонные конструкции и назначать для него определенные расходы требуемых компонентов. Одной из целью планируемых научных изысканий является разработка нормативной базы для расчетов и типовых технологических карт с целью получения фибробетона, в частности, для применения в подземных конструкциях.

ООО «НИЦ «Тоннельной ассоциации» и НИЦ «Подземное строительство» НИУ МГСУ проводят научные изыскания по использованию фибробетонов в подземных конструкциях и имеют наработки по расчету и проектированию фибробетонных конструкций, подтвержденные опытом строительства и эксплуатации. Кроме того, следует отметить, что глобальный прогресс, постоянно развивающаяся промышленность, внедрение инноваций химической индустрии позволяют в будущем резко повысить эффективность таких технологий.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тоннельные обделки, сооружаемые закрытым способом (кругового и сводчатого очертания) с позиций строительной механики, являются статически неопределимыми конструктивными системами, ра-

ботающими в подавляющем большинстве случаев в условиях внецентренного сжатия с преобладанием напряжений сжатия. В таких условиях прочностные и деформативные свойства фибробетонов (ФБ) реализуются наиболее эффективно благодаря их особым характеристикам.

Фибробетонные конструкции способны воспринимать нагрузку и сопротивляться деформированию после формирования в них трещин без хрупкого разрушения, при этом предел растяжимости ФБ (предельные относительные деформации растяжения) может превышать предел сжимаемости.

В настоящее время на территории РФ разработаны и действуют нормативные документы, позволяющие проектировать эффективные тоннельные конструкции из ФБ: СП 297[1], СП 360[2], СТО НОСТРОЙ 2.27.125[3], а также нормативно-методические руководства, например, «Руководство по проектированию бетонных и железобетонных тоннельных обделок с использованием композитных материалов», утвержденное стройкомплексом города Москвы. Технические условия и требования к контролю качества тяжелых и мелкозернистых сталефибробетонов опубликованы в ГОСТ Р 59535[4]. Своды правил СП 360 и СП 297 введены в Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального Закона от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

При всех существующих возможностях применение фибробетонов для изготовления несущих конструкций транспортных, коммунальных тоннелей, а также других ответственных сооружений городской инфраструктуры в отечественной практике строительства фибробетон распространено слабо.

АНАЛИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РФ

Фибробетон в значительно большей степени применяется в европейских странах, где лидирующие позиции занимают Испания [11, 12, 113], Италия [114, 115, 116, 117], Португалия [118], Великобритания, Германия [119, 20, 21, 22], Норвегия, Швейцария. За пределами Европы фибробетон широко применяется Австралией [23, 24], Бразилией, Перу, США [25, 26], Эквадором, Японией. С недавнего времени в Турции распространение получило применение фибробетона в креплении транспортных тоннелей методом торкретирования [27, 28].

Широкое применение обусловлено высоким уровнем научно-технического прогресса в этой теме, произошедшего за последние двадцать лет. Современный уровень техники позволяет получить значительные преимущества при использовании материала. Сопротивление поперечной силе в конструкции повышается до 57% в зависимости от различных параметров, ширина раскрытия трещин при этом уменьшается до 70% при отложенном формировании трещин в зоне действия поперечных сил [29].

По данным бюллетеня Международной Тоннельной Ассоциации за 2016 год [30, 31], с начала внедрения фибробетонов в транспортном тоннелестроении в 1982 году на метрополитене Италии до 2016 года только для щитового способа строительства тоннелей реализовано порядка 40 крупных объектов (см. табл. 1). Применялись конструкции обделок диаметрами от 4,8 до 14,3 м с армированием только стальной фиброй в 58% случаев, с комбинированным армированием «стальная фибра + стальная арматура» в 39% случаев. Один объект был реализован с применением армирования полимерной фиброй в сочетании со стальной арматурой.

Широкая практика применения фибробетонов инициирует также проведение научно-технического обоснования применения выбранных технических решений. В результате выполнения этих работ появляется возможность значительного сокращения затрат, уточнения расчетных методик. Например, при строительстве девятой линии метро в Барселоне принятое на основе расчетной методики *fib* Model Code 2010 [32] техническое решение (65 кг фибры на 1 м^3 бетона), выглядевшее эффективным, по итогам научной работы [33] было уточнено со снижением количества фибрового армирования до 45 кг/м^3.

Например, при строительстве Линии 9 метро в Барселоне, по итогам научной работы, основанной на расчетных методиках *fib* Model Code 2010 [32], удалось оптимизировать фибровое армирование блоков тоннельной обделки. Исходное техническое решение предполагало армирование блоков

[1] СП 297.1325800.2017 – Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017.

[2] СП 360.1325800.2017 – Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018.

[3] СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013 – Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ

[4] ГОСТ Р 59535-2021 – Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021.

Таблица 1

Зарубежный опыт применения сборных СФБ обделок для транспортных тоннелей [30]

Проект	Год	Страна	Назн.	$D_н$, м	h, м	Тип ФБ
Metrosud	1982	Италия	М	6.40	0.30	СФБ
Heathrow Express	1994	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
Napoli metro	1995	Италия	М	6.40	0.30	СФБ
2nd Heinenoord	1999	Нидерланды	АД	8.30	0.35	СФБ
Jubilee Line Extension	1999	Англия	М	4.90	0.20	СФБ
Essen	2001	Германия	М	8.00	0.35	СФБ
Oënzberg tunnel	2003	Швейцария	ЖД	11.40	0.30	СФБ+С
Oënzberg-TBM	2003	Швейцария	ЖД	12.20	0.40	СФБ+С
Oënzberg-Shield	2003	Швейцария	ЖД	12.20	0.40	СФБ
Barcelona Metro Line 9 - Can Zam Stretch	2003	Испания	М	11.60	0.35	СФБ
Channel Tunnel Rail Link (CTRL)	2004	Англ. - Фр.	ЖД	7.90	0.35	СФБ
Heathrow Express Extension (HexEx)	2005	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
Metropolitan Expressway Central Circular Shinjuku Route tunnel	2005	Япония	АД	11.80	0.45	СФБ+С
Barcelona Metro Line 9 - Stretch I	2006	Испания	М	9.04	0.32	СФБ+С
Lötschberg	2007	Швейцария	ЖД	4.94	0.22	СФБ
Beacon Hill Tunnels	2007	США	АД	7.30	0.30	н/д
Madrid Metro	2007	Испания	М	9.00	0.30	СФБ+С
Line 1 of the Valencia Metro	2007	Испания	М	9.20	0.40	СФБ+С
Heathrow - PiccEx	2008	Англия	М	4.80	0.15	СФБ
Heathrow Express Ext. Tunnel to T5	2008	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
São Paulo Metro Line 4	2009	Бразилия	М	9.10	0.35	СФБ
Docklands Light Railway (DLR) Extension	2009	Англия	ЖД	5.80	0.25	СФБ
Malaga Rail Tunnel	2009	Испания	ЖД	9.04	0.32	ПФБ+С
The Clem Jones Tunnel - Clem 7	2010	Австралия	АД	12.00	0.40	СФБ+С
Extension of the FGC in Terrassa	2010	Испания	ЖД	6.60	0.30	СФБ+С
Keio line	2010	Япония	ЖД	7.30	0.30	СФБ+С
Metropolitan Expressway	2011	Япония	АД	14.30	0.45	СФБ+С
Airport Link	2012	Австралия	АД	12.20	0.40	СФБ
Sagami Line	2012	Япония	АД	12.80	0.50	СФБ+С
Koishikawa Kasen	2013	Япония	ЖД	7.30	0.30	СФБ+С
The Wehrhahn Line	2014	Германия	М	8.90	0.30	СФБ
San Francisco Central Subway	2014	США	ЖД	5.96	0.28	СФБ+С
Legacy Way	2015	Австралия	АД	12.00	0.35	СФБ
Metropolitan Expressway	2015	Япония	АД	13.10	0.40	СФБ+С
Doha Metro Red North Line	2016	Катар	М	6.77	0.30	СФБ
Downtown Line 3	н.в.	Сингапур	М	6.36	0.28	СФБ
Thomson Line	н.в.	Сингапур	М	6.36	0.28	СФБ
Crossrail	н.в.	Англия	ЖД	6.80	0.30	СФБ
Brenner Base Tunnel	н.в.	Ит. - Австрия	АД	6.00	0.20	СФБ+С

фиброй с дозировкой 65 кг/м^3, предложенное оптимизированное решение – армирование фиброй с дозировкой 45 кг/м^3.

Обширный опыт зарубежных коллег свидетельствует о технико-экономической эффективности фибробетонов, особенно в тоннелестроительной отрасли, которая достигается за счет:

- сокращения трудозатрат на изготовление сборных обделок щитового способа работ и монолитных обделок горного способа работ;
- повышения производительности (скорости производства при поточном методе) при производстве сборных блоков обделок для щитового способа работ и сокращения времени на изготов-

ление монолитных обделок при горном способе работ;
- снижение процента брака при производстве сборных блоков, а также их транспортировании и монтаже блокоукладчиком.

В отечественном тоннелестроении до настоящего времени нет прецедента применения фибробетонных обделок тоннелей на объектах транспортного и даже коммунального назначения.

Фибробетонные тоннельные конструкции применялись в рамках опытных участков метрополитена в Москве (фибронабрызгбетонная рубашка перегонного тоннеля и замковые блоки из фибробетона) и Санкт-Петербурге (3 кольца обделки) [34, 35, 36, 37], при этом на момент сооружения опытных участков использовалась стальная фибра, которая, по состоянию вопроса на сегодняшний день, не является рациональной для применения в несущих конструкциях, работающих в условиях напряженного состояния внецентренного сжатия.

В то же время примечательно, что первенство в применении ФБ принадлежит Российским инженерам [38]: Владимир Павлович Некрасов в начале 20 века (1907–1909) исследовал и запатентовал состав бетона, армированного отрезками проволоки (монография 1925 года «Метод косвенного вооружения бетона»).

Основными проблемами внедрения ФБ в подземном строительстве и, в частности, для сооружения тоннельных обделок различного назначения являются:
- отсутствие прецедентов использования ФБ конструкций на реальных объектах в условиях РФ, а наличие двух-трех опытных участков, выполненных в 90-е – 2000-е годы, не дает корректной информации о технико-экономической эффективности материала;
- слабая осведомленность проектных организаций и органов государственной экспертизы о возможностях, перспективах и условиях эффективного применения ФБ, а также отсутствие методологических наработок в части проектирования и расчета конструкций из ФБ;
- отсутствие оснащенности ЗЖБК (дозаторы, диспергаторы, специальные смесители), в том числе отсутствие специального оснащения для испытания фибробетонных образцов в лабораториях контроля качества;
- нет накопленной статистики по испытаниям ФБ образцов в условиях РФ для различных классов ФБ, не наработана практическая база конструкций обделок в увязке с классами ФБ;
- нет специализированных курсов (лекций) по ФБ конструкциям подземных сооружений и тоннелей в вузах.

В настоящее время обобщенно конструкционные фибробетоны можно классифицировать:
- по типу бетона-матрицы – из бетона нормальной прочности (до В60); высокопрочного бетона – ВПБ (В60-В100[150]); сверхвысокопрочного бетона – СВПБ (выше В150);
- по типу применяемой фибры – из стальной (проволочной с отгибами R > 1200 МПа); полимерной (прямой R > 800 МПа); комбинации микрофибры и конструкционной фибры;
- по типу армирования в конструкции – фибра одного типа; комбинация фибры одного типа и стержневого армирования без преднапряжения; фибра двух типов (гибрид) и стержневого армирования без преднапряжения; фибра двух типов (гибрид) и преднапряженная арматура;
- по характеру работы с трещинами – с разупрочнением (обычный ФБ); с упрочнением (большое содержание фибры как в ФБ нормальной прочности, так и в ВПБ или СВПБ).

В связи с особенностями характера работы, нормирование фибробетонов по физико-механическим характеристикам осуществляется двумя классами – классом бетона (бетона-матрицы) по прочности на сжатие В и классом фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F.

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F определяется по испытаниям образцов-призм сечением 150×150 мм длиной 550...600 мм с надрезом по центру (см. рис. 1) или без надреза либо круглых плит диаметром 800 мм, толщиной 75 мм [39]. В ходе испытаний фиксируются прикладываемая нагрузка и ширина раскрытия надреза (в случае образца-призмы с надрезом) либо прогиб образца по центру (в случае образца-призмы без надреза и круглой плиты).

Особенностью проведения испытаний является использование специального сервогидравлического оборудования для нагружения и контроля за деформациями образцов, обладающего практически мгновенным откликом на изменение жесткости образца вследствие процессов формирования микро- и макротрещин, что позволяет зафиксировать на графиках «Нагрузка – Деформация» нисходящие участки (стадию разупрочнения).

На схеме (рис. 2) приведены результаты испытаний образцов-призм с надрезом, при этом шкала сосредоточенной нагрузки F заменена шкалой нормальных напряжений в центральном сечении образца σ_N, шкала CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) обозначает линейные деформации нижней кромки надреза образца (моделирование роста трещины). Прочность, соответствующая малой области деформаций (вторая группа предельных состояний), при $CMOD_1$ = 0,5 мм обозначается на схеме как f_{R1}. Проч-

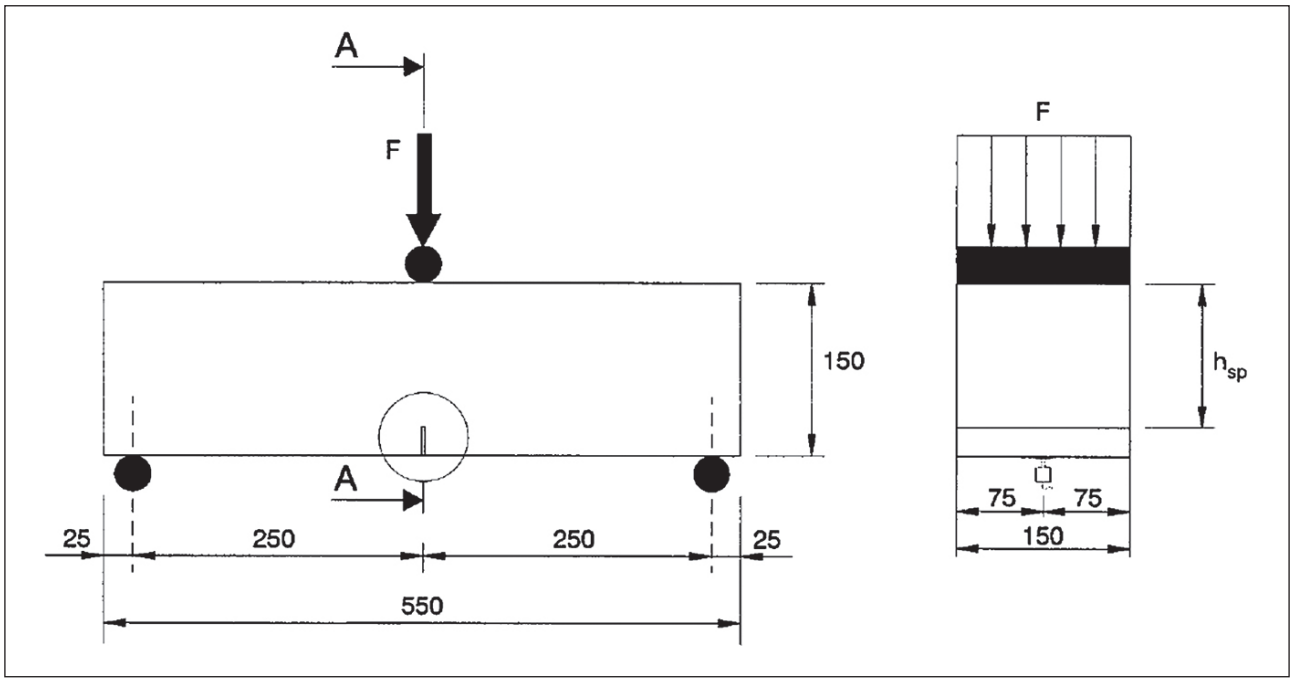

Рис. 1. **Пример схемы испытания образца-призмы с надрезом для определения класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F**

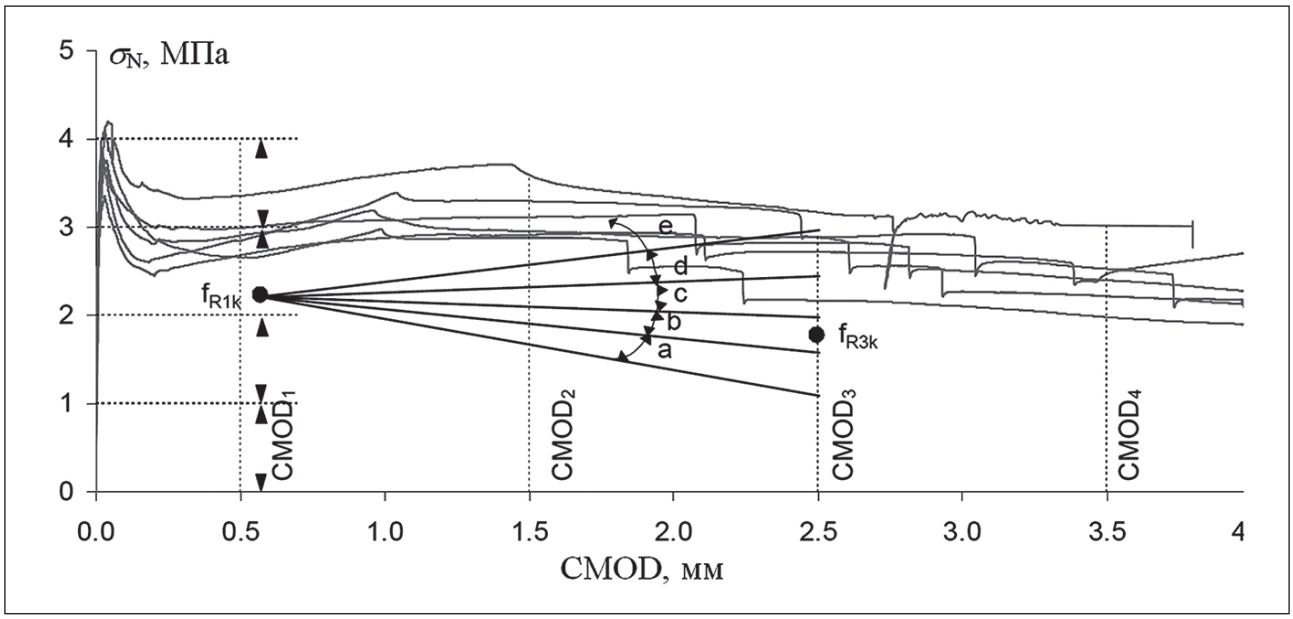

Рис. 2. **Схема определения класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F на основе результатов испытания образцов-призм с надрезом**

ность, соответствующая предельным деформациям (первая группа предельных состояний), при $CMOD_3$ = 2,5 мм обозначается на схеме как f_{R3}. Для нормирования класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F используются два показателя: f_{R1}, который записывается в обозначении числом с округлением в меньшую сторону до ближайшего нормируемого класса; соотношение f_{R3}/f_{R1} с ранжированием по диапазонам и обозначением латинскими буквами:

a – при $0,5 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 0,7$;
b – при $0,7 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 0,9$;
c – при $0,9 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 1,1$;
d – при $1,1 \leqslant f_{R3}/f_{R1} < 1,3$;
e – при $1,3 \leqslant f_{R3}/f_{R1}$.

Например, на схеме рис. 2 для обозначенных точек f_{R1} и f_{R3} класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение должен быть записан как B_F2,0b (с учетом статистической обработки результатов испытаний для f_{R1} и f_{R3}).

Необходимо отметить, что в СП 297, СП 360 при принятой авторами СП концепции европейских нормативных документов в части классификации фибробетонов допущена опечатка в буквенном обозначении диапазонов соотношений f_{R3}/f_{R1}.

Таким образом, полное обозначение класса фибробетона (без указания марок по водонепроницаемости и морозостойкости) выглядит, например, как:

СФБ В40 B_F3,0b – сталефибробетон на основе бетона В40 с классом фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F3,0b;

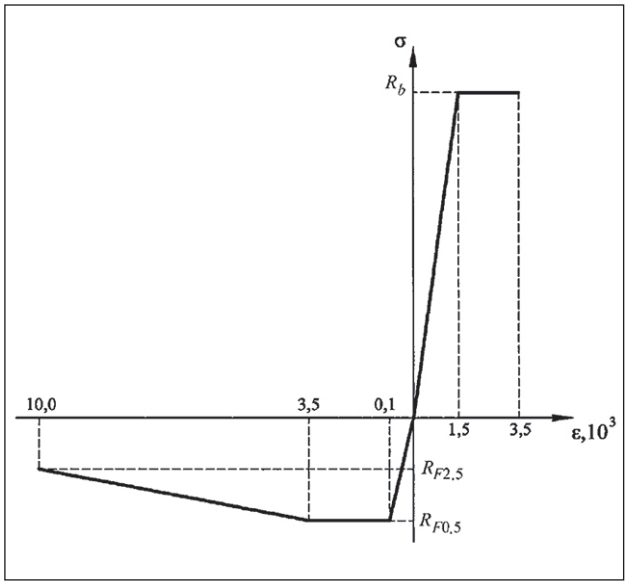

Рис. 3. **Пример диаграммы напряженно-деформированного состояния фибробетона** (СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013)

ПФБ В40 B_F3,0b – фибробетон на основе бетона В40 и полимерной фибры, с классом фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F3,0b.

Преимуществом такой классификации фибробетона являются четко обозначенные физико-механические характеристики фибробетона (до его изготовления) для определенного класса, который может быть подобран при проектировании и расчете фибробетонной конструкции. Проектировщики в данном случае освобождаются от необходимости принятия решения о том, какой тип и дозировка фибры потребуется для достижения подобранного расчетами класса фибробетона, аналогично ситуации, когда проектировщики не задаются вопросом, какой щебень и песок необходимо использовать при производстве, чтобы получить бетон того или иного класса.

Каждому классу фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F будет соответствовать диаграмма состояния (диаграмма деформирования материала) (см. рис. 3, 4), которая может быть построена по нормированным прочностным и деформативным показателям (табл. 2).

Таким образом, при наработке статистической базы испытаний фибробетонных образцов (в условиях РФ) у производителей ФБ конструкций возникнет понимание, какая фибра и какое ее количество требуется для обеспечения того или иного класса фибробетона.

В мировой практике использования фибробетонов в тоннелестроении и других областях строительства активно развиваются следующие направления:

- производство облегченных конструкций тоннельных обделок (уменьшение толщины обделки) [40];
- сокращение или исключение стержневого армирования для сборных и монолитных обделок (значительное уменьшение или полное исключение основного продольного армирования, попереч-

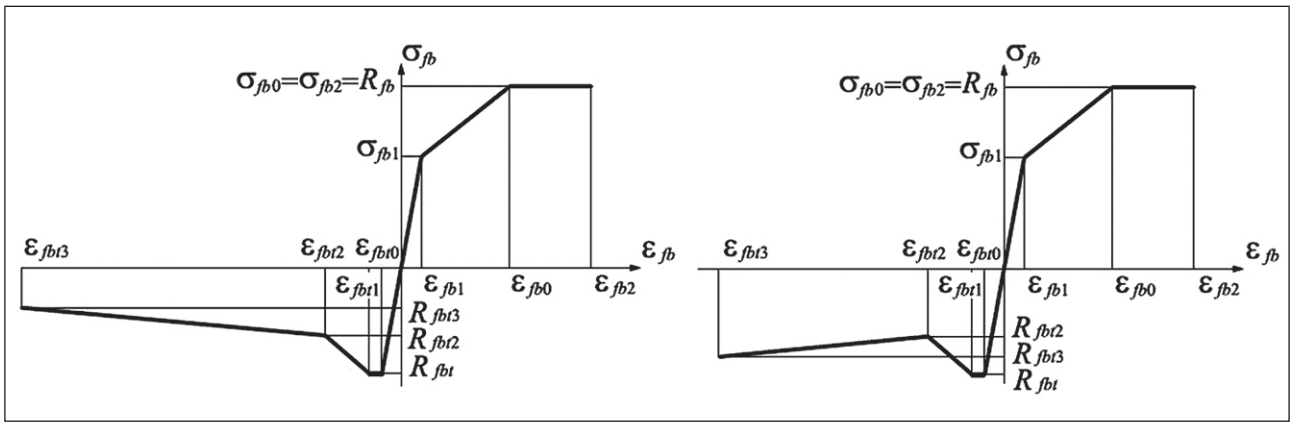

Рис. 4. **Пример диаграмм напряженно-деформированного состояния фибробетона (СП 360.1325800.2017)**

Табл. 2

Значения нормативных сопротивлений (табл. 5.2.1. СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013)

B_F		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$R_{F0.5,n}$ и $R_{F0.5,ser}$		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
$R_{F2.5,n}$ и $R_{F2.5,ser}$	*a*	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00
	b	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	3,50	3,85	4,20	4,55	4,90	5,25	5,60
	c	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,50	4,95	5,40	5,85	6,30	6,75	7,20
	d	0,55	1,10	1,65	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	5,50	6,05	6,60	7,15	7,70	8,25	8,80
	e	0,65	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20	5,85	6,50	7,15	7,80	8,45	9,10	9,75	10,40
$R_{F0.5}$		0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00	4,33	4,67	5,00	5,33
$R_{F2.5}$	*a*	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,33	2,50	2,67
	b	0,23	0,47	0,70	0,93	1,17	1,40	1,63	1,87	2,10	2,33	2,57	2,80	3,03	3,27	3,50	3,73
	c	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	4,80
	d	0,37	0,73	1,10	1,47	1,83	2,20	2,57	2,93	3,30	3,67	4,03	4,40	4,77	5,13	5,50	5,87
	e	0,43	0,87	1,30	1,73	2,17	2,60	3,03	3,47	3,90	4,33	4,77	5,20	5,63	6,07	6,50	6,93

ного армирования, исключение конструктивного армирования) [41, 42];

- производство конструкций из высокопрочного и сверхвысокопрочного фибробетона (гибридного фибробетона с применением двух видов фибры – микрофибры и конструкционной фибры) [43, 44];
- производство конструкций, работающих на изгиб (балки, плиты больших пролетов) [42];
- исследования напряженного состояния элементов фибробетонных конструкций, работающих на кручение [45];
- исследования и разработка эффективных анкерующих устройств для стальной проволочной фибры;
- разработка методов и способов ориентирования фибры в конструкциях с целью повышения эффективности армирования [46];
- разработка новых и совершенствование существующих методов контроля качества ФБ конструкций;
- совершенствование методов испытаний ФБ образцов с целью снижения процента выбраковки, снижения коэффициента вариации, повышения точности измерений [447].

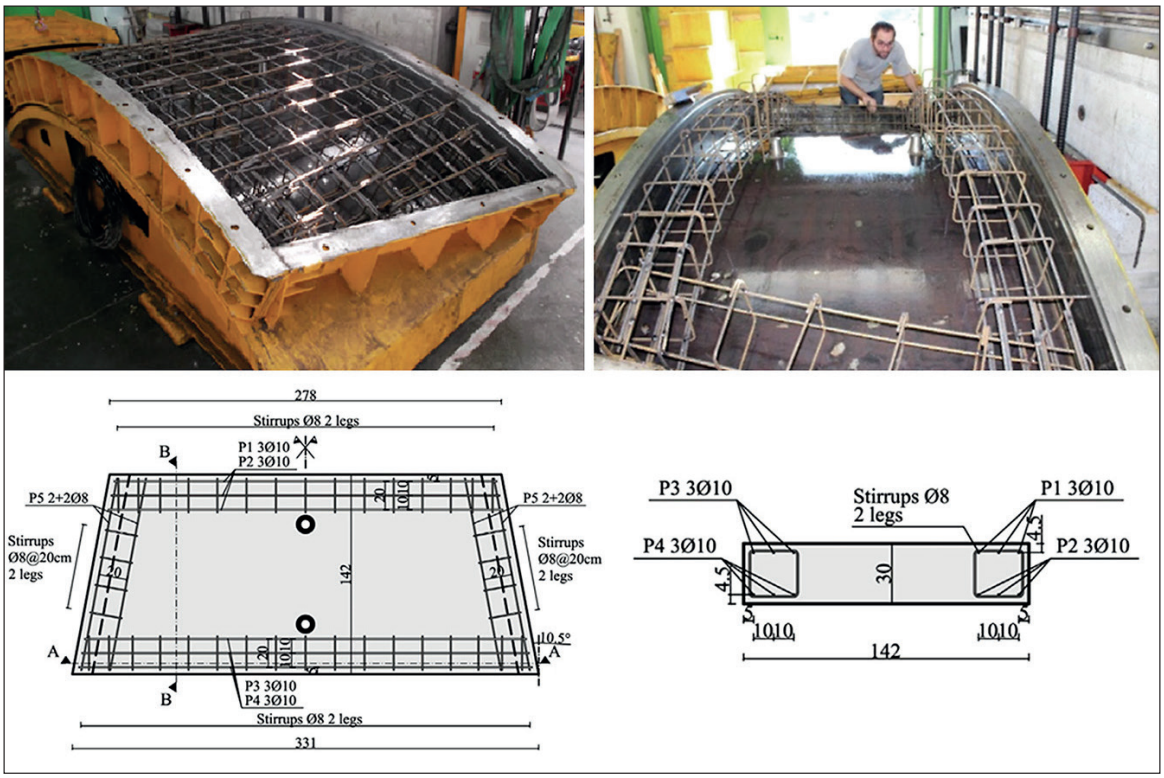

Рис. 5. **Опыт «оптимизации» армирования сборной обделки (Испания)**

В качестве наглядных примеров реализации результатов исследований в транспортных тоннелях следует отметить опыт испанских [41] и итальянских [42] специалистов по «оптимизации» армирования сборных и монолитных обделок тоннелей (см. рис. 5, 6).

В случае, представленном на рис. 5, – сборная обделка перегонного тоннеля метрополитена в Испании. В базовом варианте традиционного армирования количество стержневого армирования составляло примерно 150 кг/м^3. Инженерами было предложено решение применить фибробетон на основе бетона класса B45 и стальной проволочной фибры в количестве 45 кг/м^3 в комбинации со стержневым армированием из неметаллической арматуры, устраиваемым локально – вдоль поперечных/кольцевых и продольных/радиальных граней блоков, для восприятия усилий от щитовых домкратов при проходке (поперечные/кольцевые грани) и восприятии сжимающих напряжений, формирующихся в блоках от горного давления (продольные/радиальные грани). Предложенное техническое решение позволило исключить применение стальной арматуры с упрощением формы стержневых каркасов и за счет снижения финансовых затрат и трудовых ресурсов при изготовлении армокаркасов достичь экономии при производстве блоков до 12%.

В случае, представленном на рис. 6, – монолитная обделка автодорожного тоннеля в Турине (Италия). Базовый вариант предполагал традиционное армирование обделки отдельными стержнями, что является трудоемким процессом на стадии возведения монолитной обделки. После расчетного обоснования «оптимизированного» армирования было предложено решение по исключению стержневого армирования в своде и стенах тоннеля до зоны концентрации на-

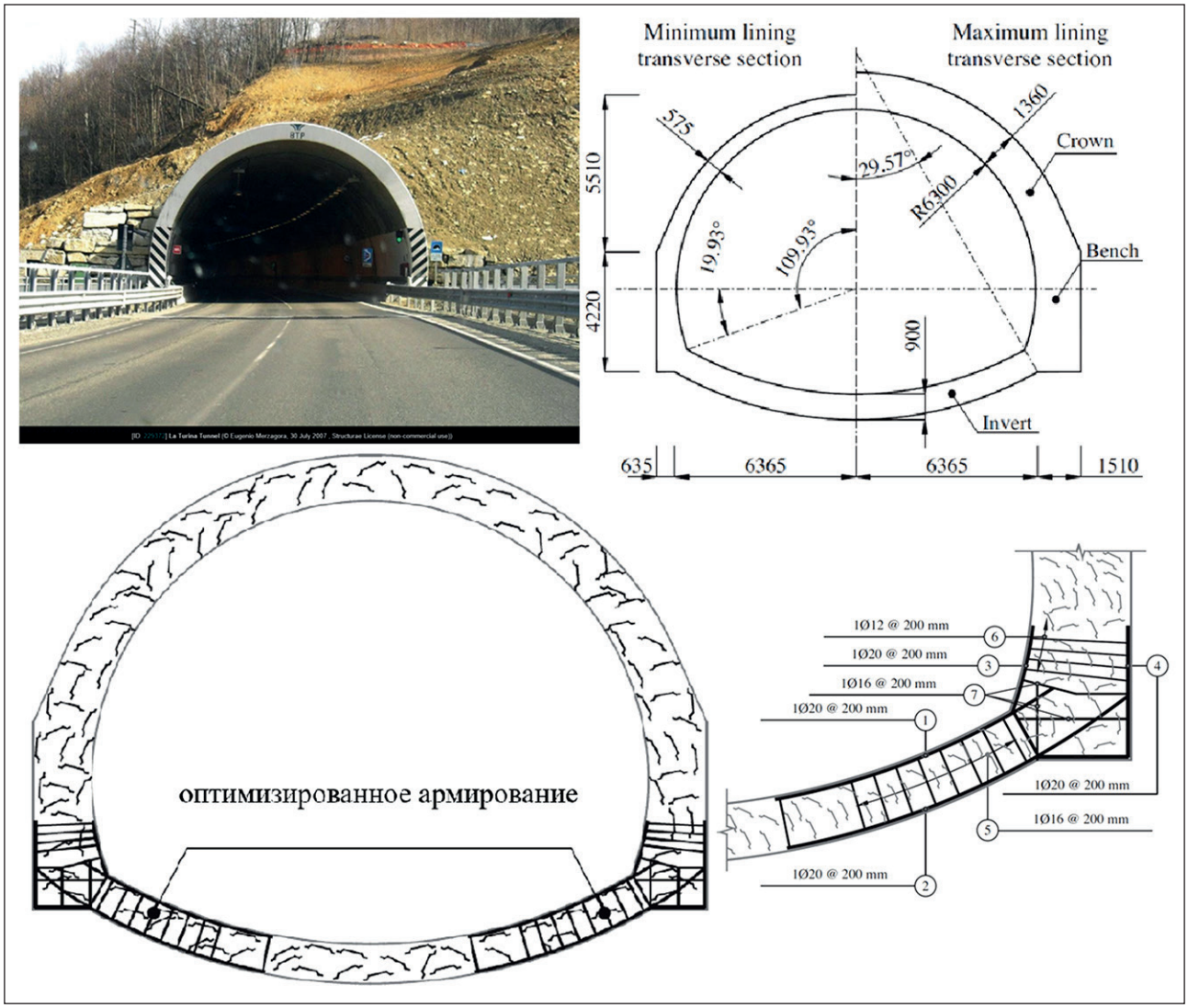

Рис. 6. **Опыт «оптимизации» армирования сборной обделки (Италия)**

пряжений в углах сопряжения стен с обратным сводом, а также исключение стержневого армирования в средней трети обратного свода обделки.

Оставшееся стержневое армирование в зонах с концентрацией растягивающих напряжений предложено реализовать в виде плоских каркасов, которые возможно заготавливать на строительной площадке и доставлять на монтаж в тоннель на участок армирования с целью максимального сокращения трудозатрат и сроков производства работ.

Достигнутые результаты при реализации данного технического решения: 30% сокращение количества арматуры в целом (суммарно по массе стали – арматура + фибра); 75% сокращение стержневой арматуры; значительное упрощение армирования; исключение наиболее трудоемкого процесса армирования свода; сокращение сроков строительства тоннеля.

ВЫВОДЫ

В качестве основных выводов следует отметить:

- в настоящее время в условиях Российской Федерации нет препятствий к проектированию и производству ФБ конструкций тоннелей и подземных сооружений;
- производители стальной фибры готовы обеспечить производство достаточным количеством фибры;
- внедрение фибробетонов в российских условиях сдерживается «страхом нового», малым опытом работы с ФБ, неналаженной технологией производства ФБ конструкций и контроля их качества;
- заводам ЖБК необходимо вложение средств на дооснащение специализированным оборудованием для производства ФБ конструкций – автоматические дозаторы, интегрируемые в технологический процесс;
- лабораториям необходимо специальное испытательное оборудование с сервогидравликой для контроля качества;
- при использовании фибробетонных конструкций ожидаемый эффект, в основном, связан с сокращением трудозатрат на изготовление арматурных изделий и достигает: 5...20% для сборных ФБ обделок щитового способа; 10...30% для монолитных ФБ обделок горного способа, а также фибронабрызгбетонных крепей и первичных обделок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ige Samuel Ayeni, Jamaludin Mohamad Yatim, Nor Hasanah. A review of hybridised use of fibres in shear behaviour of fibre-reinforced concrete beams. ASEAN Engineering Journal. 2024. https://doi.org/10.11113/aej.V14.20314

2. Kotha Hima Bindu, Mudigonda Rathna Chary, Jagadish Shrisaila Haranatti. Behavior of High Strength Reinforced Cement Concrete with Polypropylene and Steel Fibres.MATEC Web of Conferences 392. March 2024. https://doi.org/10.1051/matecconf/202439201011

3. R. Lal, Surender Kumar Verma, Chander Sheikhar Singla. Fibre Reinforced Concrete: An Overview.Conference: International Conference on Emerging Trends in Engineering Innovations and Technology Management (ICET: EITM-2017) NIT Hamirpur, India. December 16–18. 2017.

4. Rui Valente, Mário Pimentel. Fibre reinforced concrete under in-plane shear stresses. Engineering Structures. 2024; 307: 117890. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117890

5. Charankumar Ashok Kamble. Strength properties of hybrid fibre reinforced concrete using fly ash. Interantional journal of scientific research in engineering and management . 2023; 07(09). https://doi.org/10.55041/IJSREM25834

6. Yazhini Ezhilarasan, R. Chithra. Performance study of fibre reinforced functionally graded concrete pipes. Construction and Building Materials. 2022; 344(1):128224. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128224

7. Florence More, Senthil Selvan. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. Buildings. 2022; 12(9):1436. https://doi.org/10.3390/buildings12091436

8. Salahaldein Alsadey, Miftah Abdallateef, Muftah Mohamed, Abdalrhman Milad. Investigating Behaviour of Reinforced Concrete with Glass Fibre. Jurnal Kejuruteraan 2021; 33(3):559-577. https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(3)-16

9. Libo Yan, Nawawi Chouw. A comparative study of steel reinforced concrete and flax fibre reinforced polymer tube confined coconut fibre reinforced concrete beams. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013; 32 (16):1155–1164. https://doi.org/10.1177/0731684413487092

10. Abdullah O. Baarimah, Sharifah Maszura Syed Mohsin. Mechanical properties of steel/kenaf (hybrid) fibers added into concrete mixtures /IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018; 342(1):012075. https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012075

11. de la Fuente A., Lin L., Cavalaro S.H.P., Aguado de Cea A. Fibre reinforced precast concrete segments: design and applications. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.

12. Liao L., de la Fuente A., Cavalaro S., Aguado A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. Tunnelling and Underground Space Technology. 2015; 47: 200-210.

13. Serna P., Llano-Torre A., Martí-Vargas J., Navarro-Gregori J. Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB) in 2020.

14. di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. Materials and Structures. 2009; 42:1261–1281. https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4

15. di Prisco M., Tomba S., Bonalumi P., Meda A. On the use of macro synthetic fibres in precast tunnel segments. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly May 22–28, 2015. Lacroma Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia.

16. di Prisco M., Colombo M., Dozio D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. Structural Concrete. 2013. 14: 4. https://doi.org/10.1002/suco.201300021

17. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Romualdi P. Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. Tunnelling and Underground Space Technology. 2011; 26: 284-291.

18. Barros J. Recent developments on the analysis and design of fibre reinforced concrete structures. 14th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", 5–6 October 2023. Lithuania.

19. Winterberg R. Use of macro synthetic fibre in segmental tunnels. BEFIB2021, 096. v3.

20. Plückelmann S., Breitenbücher R., Smarslik M., Mark P. Aufnehmbare Teilflächenspannung von hochfestem. Stahlfaserbeton Beton- und Stahlbetonbau 2019. 114: Heft 9.

21. Hansel D., Guirguis P. Stahlfaserbeton-Tübbinge: Stand der Technik und realisierte Projekte (Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects). Tunnel. 2011; 1.

22. Smarslik M., Mark P. Hybrid reinforcement design of longitudinal joints for segmental concrete linings. Structural Concrete. 2019; 1–15. https://doi.org/10.1002/suco.201900081

23. Bernard E.S., Thomas A.H. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. Tunnelling and Underground Space Technology. 99 (2020) 103302.

24. Bernard E.S., Clements M.J.K, Duffield S.B., Morgan D.R. Development of Macro-synthetic Fibre Reinforced Shotcrete in Australia. In: Seventh International Symposium on Sprayed Concrete for Underground Use, June 16–19, Sandefjord, Norway. 2014; 67–75.

25. El-Helou R., Graybeal B. Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams. Structural Engineering Journa. 2022.

26. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. PUBLICATION NO. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013.

27. Eryiğit H., Sayin A., Kocak B. An overview of the construction of turkey's longest road tunnel focusing on ground support using macro synthetic fibers as shotcrete reinforcement. Engineering, Environmental Science. 2014.

28. Namli M. Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects. Underground Space 2021; 6 (6): 732-750.

29. Abbood I., Faleh Al-Bayati A. Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete flat slabs: a literature review and design codes evaluation, Kerbala, Iraq, 2021.

30. Twenty years of FRC tunnel segments practice: lessons learnt and proposed design principles / ITA Report #16 / ISBN : 978-2-970 1013-5-2. April, 2016.

31. Design guidance for precast fibre reinforced concrete segments / ITAtech Report #7 / ISBN: 978-2-9701013-2-1/ April, 2016.

32. fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013 / ISBN:9783433030615 / https://doi.org/10.1002/9783433604090

33. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010 / Tunneling and Underground Space Technology, № 47, p. 200–210, 2015.

34. Matveev G., Kagan M. Key segments made of SFRC // Metrostroy. 1981. № 2. p. 10.

35. Kagan M. Density of segment reinforced by steel fibre // Metrostroy. 1985. № 1. pp. 29-30.

36. Cyvian B. Steel Fibre Reinforced Concrete linings // Metrostroy. 1986. № 4. pp. 30–31, № 6. pp. 29–32.

37. Kagan M. Comparison of the actual compressive strength of concrete and steel fibre reinforced concrete segments // Metrostroy. 1987. № 3. pp. 19–22.

38. Nekrasov V.P. The method of indirect reinforcing of concrete. M.: NKPS Transpechat, 1925.

39. ASTM C 1550. Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).

40. Trabucchi I., Smarslik M., Tiberti G., Petraroia D.N., Plizzari G.A., Mark P. A hybrid solution proposal for precast tunnel segments. Structural Concrete. 2021;1–15. https://doi.org/10.1002/suco.202000629

41. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., De Rivaz B., Giamundo N. Experimental Behaviour of Precast Tunnel Segments in Steel Fiber Reinforcement with GFRP Rebars. FRC2018: Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications Joint ACI-fib-RILEM International Workshop.

42. Tiberti G., Minelli F., Plizzari P. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. Composites. Part B 58. 2014; 199–207.

43. Tengilimoglua O., Akyuzb U. Experimental study on hybrid precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibres and glass fibre reinforced polymer bars. Tunnelling and Underground Space Technology 2020; 106.

44. Conforti A., Trabucchi I., Tiberti G., Plizzari G., Caratelli A., Meda A. Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers. Engineering Structures. 2019; 199: 109628, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109628

45. Facconi L., Amin A., Minelli F., Plizzari G. A unified approach for determining the strength of Frc members subjected to torsion—Part I: Experimental investigation. Structural Concrete.2021; 1–17. https://doi.org/10.1002/suco.202100161

46. Medeghini F., Guhathakurta J., Tiberti G., Simon S., Plizzari G., Mark P. Steered fiber orientation: correlating orientation and residual tensile strength parameters of SFRC. Materials and Structures. 2022; 55:251. https://doi.org/10.1617/s11527-022-02082-9

47. Carmona S., Molins C., García S. Application of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of FRS in underground mining works. Construction and Building Materials 2020; 246.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русанов Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «НИЦ «Тоннельная ассоциация», Москва, Россия, rusanov.ve@nizta.ru, https://orcid.org/0000-0002-8199-7214

Маслов Павел Сергеевич – руководитель направления Стальная фибра ОАО «Северсталь-метиз», Череповец, Вологодская область, ps.maslov@severstalmetiz.com, https://orcid.org/0009-0005-0241-8712

Алексеев Вячеслав Александрович – директор НОЦ «Подземное строительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, 634586@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2705-5354

ВКЛАД АВТОРОВ

Русанов В.Е. – научное руководство, концепция исследования; написание исходного текста.

Маслов П.С. – концепция исследования, написание исходного текста.

Алексеев В.А. – научное руководство, итоговые выводы, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 29.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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, cooperation 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 actives, 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 reproductibility

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), Великобритания, 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 искусственного 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 самолично 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 Авторов.
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 редколлегией 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, редколлегии, 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 редколлегии 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 редколлегии 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 аппеляций 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, организуя немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

Заимствования 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;
- 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), 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;
- 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), 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 соотвествует 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 наноиндустрии
- 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 наноиндустрии.

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 нанопокрытием; 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, 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 большему 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.