



IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Application Of Polyvinyl Chloride for Nanocomposites (Analysis and Optimization of Quality Indicators)
- Iron Oxide Pigment as a Coloring Nanofill for Decorative Concrete Products
- Lyophobic Sols «БЕТОПРЕСС»® as Additives to Chemical Admixtures into Concrete
- Wood-Polymer Nano-Modified Composite Materials for Construction Purposes

Happy New Year 2024!

- Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества)
- Железооксидный пигмент как красящий наноуполнитель декоративно-бетонных изделий
- Лиофобные золи «БЕТОПРЕСС»® в качестве присадок к химическим добавкам в бетон
- Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы

С Новым 2024 годом!

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)

*Happiness, joy
and fulfilling your wishes
in the New Year!*



2024

The Editors, Editorial Council and Editorial Board of the Electronic Edition
«Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal»

e-mail: info@nanobuild.ru

*Счастья, радости
и исполнения желаний
в Новом году!*



2024

Редакция, редакционный совет и редакционная коллегия электронного издания «Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал»

e-mail: info@nanobuild.ru

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

ISSN 2075-8545 (online)

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

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

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

The main tasks:

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

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

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

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

The language of publication: English; Russian.

The edition's readers and authors are:

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

EDITORS

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

EXECUTIVE EDITORIAL SECRETARY – Vladimir I. VEDENYAPIN, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

DEPUTY CHIEF EDITOR – Leonid A. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

EXECUTIVE EDITOR – Yulia A. EVSTIGNEEVA, Member of Russian Association of Journalists, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

HEAD OF DESIGN DEPARTMENT – Andrey S. REZNICHENKO, Businessman, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

CHIEF FOR FOREIGN RELATIONS – Zhanna V. PISARENKO, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The Journal is registered as an independent mass media in the Ministry of Communication and Mass Media of the Russian Federation. (Registration Certificate ЭЛ № ФЦ77 – 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: la.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 № 6 (Vol. 15) is 15.12.2023

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE
OF INTELLECTUAL PROPERTY
(CHINA)

CONTENTS

HAPPY NEW YEAR 2024!	514
PUBLISHER INFORMATION	515
TO THE AUTHORS AND READERS	
The Index Copernicus Value (ICV) of the journal "Nanotechnologies in Construction" for 2022 has increased	518
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S.</i> Application Of Polyvinyl Chloride for Nanocomposites (Analysis And Optimization of Quality Indicators)	519
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Aminova E.K., Kasyanova L.Z., Islamutdinova A.A., Asfandiyarova L.R.</i> Iron Oxide Pigment as a Coloring Nanofill For Decorative Concrete Products	531
<i>Khovansky V.E.</i> Lyophobic sols «БЕТОПРЕСС»® as additives to chemical admixtures into concrete.....	538
<i>Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Ovsyannikova I.V., Matveeva A.Yu.</i> Wood-Polymer Nano-Modified Composite Materials for Construction Purposes	543
<i>Bashirov M.G., Vildanov R.G., Khafizov A.M., Khismatullin A.S., Akchurin D.Sh.</i> Intelligent Eco-Monitoring System for Selecting a Residential Development Site with Nanofiber-Based Window Filter Screens	552
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology.....	559
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Kabdushev A.A., Agzamov F.A., Manapbayev B.Zh., Moldamuratov Zh.N.</i> Microstructural Analysis of Strain-Resistant Cement Designed for Well Construction.....	564
THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES	
<i>Abdykalykov A., Aidaraliev Zh.K., Abdykalyk kyzy Zh., Kuduev A.Zh., Rashid kyzy B.</i> Suitability Of Basalt Raw Materials Of The Kyrgyz Republic For The Production Of Superthin And Continuous Fibers.....	574
<i>Rada A.O., Kuznetsov A.D., Akulov A.O., Kon'kov N.Yu.</i> Managing The Accuracy and Speed of Processes For Automated Monitoring Of Construction Works In The Context Of New Technologies.....	583
<i>Aidaraliev Z.K., Rysbaeva I.A., Bekbolot kyzy B., Chimchikova M.K., Rashid kyzy B.</i> Production of Polycrystalline Silicon by Chlorination From Rice Husk And Purification Of Chlorine-Containing Gases By Adsorption Method	592
CONTENT OF THE ISSUES PUBLISHED IN 2023	602
PUBLISHING ETHICS	608
AUTHOR GUIDELINES	612
CALENDAR 2024	617

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

ISSN 2075-8545 (online)

«Нанотехнологии в строительстве» – рецензируемый научный журнал.

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

Основные задачи:

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

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

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

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

Язык издания: русский; английский.

Авторами и читателями издания являются:

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

РЕДАКЦИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель – ООО «Центр Новых Технологий «Наностроительство», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Контакты: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

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

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

Дата выхода в свет № 6, Том 15, 2023: 15.12.2023 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



РОССИЙСКОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



МЕЖДУНАРОДНОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)



ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

СОДЕРЖАНИЕ

С НОВЫМ, 2024 ГОДОМ!	514
ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	515
К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ	
Значение показателя Index Copernicus Value журнала «Нанотехнологии в строительстве» за 2022 год повысилось	518
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С.</i> Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества)	519
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Аминова Э.К., Касьянова Л.З., Исламутдинова А.А., Асфандиярова Л.Р.</i> Железооксидный пигмент как красящий нанонаполнитель декоративно-бетонных изделий.....	531
<i>Хованский В.Е.</i> Лиофобные золи «БЕТОПРЕСС»® в качестве присадок к химическим добавкам в бетон.....	538
<i>Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В., Овсянникова И.В., Матвеева А.Ю.</i> Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы.....	543
<i>Баширов М.Г., Вильданов Р.Г., Хафизов А.М., Хисматуллин А.С., Акчурун Д.Ш.</i> Интеллектуальная система экомониторинга для выбора участка застройки жилых домов с применением оконных сеток-фильтров на основе нановолокна	552
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	559
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н.</i> Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин	564
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Кудуев А.Ж., Рашид кызы Б.</i> Пригодность базальтового сырья Кыргызской Республики для производства супертонких и непрерывных волокон	574
<i>Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Коньков Н.Ю.</i> Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий.....	583
<i>Айдаралиев Ж.К., Рысбаева И.А., Бекболот кызы Б., Чимчикова М.К., Рашид кызы Б.</i> Получение поликристаллического кремния хлорированием из рисовой шелухи и очистки хлорсодержащих газов адсорбционным методом.....	592
СОДЕРЖАНИЕ НОМЕРОВ ЖУРНАЛА, ВЫШЕДШИХ В 2023 ГОДУ	602
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	608
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	612
КАЛЕНДАРЬ НА 2024 ГОД	617

TO THE AUTHORS AND READERS

The Index Copernicus Value (ICV) of the journal “Nanotechnologies in Construction” for 2022 has increased



Dear authors and readers of the journal “Nanotechnologies in Construction.”

We would like to inform you that based on the evaluation of the questionnaire data and analysis of journal issues from the year 2022, the experts **at Index Copernicus have determined the Index Copernicus Value (ICV) of the journal “Nanotechnologies in Construction” (ISSN: 2075-8545) listed in the ICI Journals Master List Database. The ICV for 2022 stands at 123.93**, a notable increase from previous years (for reference: ICV 2021: 96.46; ICV 2020: 95.79; ICV 2019: 94.02). More details available here: <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=56658>.

The ICI Journals Master List is a prestigious international database of academic periodicals, systematically evaluated each year for over two decades now.

Inclusion within this list requires passing a comprehensive parametric assessment, currently based on more than 100 criteria. Periodicals that meet all formal prerequisites and indexing requirements are awarded an ICV, reflecting the journal’s overall development and its scientific impact within its specific field.

This process allows conscientious editors prioritizing consistent indexing to track the long-term progress and dynamics of their journal’s evolution.

Our congratulations to the authors and readers on this achievement!

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

The motto of the journal since its foundation is “GIGA success is being built from NANO”, and it has become more and more a reality over the past 15 years.

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

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

We hope for further fruitful cooperation.

If you have any questions, please contact us via e-mail: info@nanobuild.ru

Publishing House of the journal “Nanotechnologies in Construction”

Значение показателя Index Copernicus Value журнала «Нанотехнологии в строительстве» за 2022 год повысилось



Уважаемые авторы и читатели журнала «Нанотехнологии в строительстве»,

сообщаем вам, что на основе проверки информации из оценочной анкеты и анализа выпусков за 2022 год **эксперты Index Copernicus установили значение показателя Index Copernicus Value (ICV) журнала «Нанотехнологии в строительстве» (ISSN: 2075-8545) в базе ICI Journals Master List за 2022 год: ICV 2022 = 123,93**, что выше, чем значение показателя ICV за предыдущие годы (для сравнения: ICV 2021 = 96,46; ICV 2020 = 95.79; ICV 2019 = 94.02).

Ссылка – <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=56658>

ICI Journals Master List — это престижная международная база, в которой каждый год оцениваются периодические издания на протяжении более 20 лет. Условием индексации является положительное прохождение многомерной параметрической оценки, основанной в настоящее время на более чем 100 критериях. Периодические издания, которые соответствуют условиям индексации, получают индекс ICV, который отражает уровень развития журнала и его влияние на мир науки в определенной области. Благодаря этому редакции, которые заботятся о непрерывности индексации, имеют возможность следовать многолетнему пути и динамике развития журнала.

Поздравляем авторов и читателей журнала с этим событием!

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

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

Приглашаем ведущих ученых и специалистов к публикации материалов о своих исследованиях.

Надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

По всем вопросам просим обращаться по e-mail: info@nanobuild.ru

Издательство журнала «Нанотехнологии в строительстве»

Application of polyvinyl chloride for nanocomposites (analysis and optimization of quality indicators)

Yulia F. Kovalenko* , Ekaterina A. Shulaeva , Nikolai S. Shulaev 

Institute of Chemical Technologies and Engineering of Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia

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

ABSTRACT: Introduction. The application of nanocomposites in various industries has increased in recent years due to their unique properties and performance characteristics. Enhancing the quality performance of nanocomposites presents a formidable challenge, primarily attributable to the intricate interactions among their constituent elements. This paper presents an overview of the methods used to analyze and calculate the quality performance of nanocomposites using PVC as the base material. **Methods and materials.** To calculate technological parameters that are not directly measurable, we conducted a thorough analysis of literature sources related to the specific process under consideration. Through this analysis, we established appropriate relationships between empirical data in accordance with the fundamental principles of thermodynamics and mass transfer processes. In the course of the research, the method of neural networks was applied in order to describe the process of vinyl chloride polymerization carried out by suspension method. To solve this problem, a cascade network with forward propagation of the signal and backward propagation of the error was applied. Network composition: in the hidden layer – ten sigmoid neurons, in the output layer – two linear neurons. **Results and Discussion.** Throughout this research, it was observed that the heat flux during polymerization exhibits temporal variation, contingent upon the concentration level of the initiator. Further the dependencies obtained can be used in controlling the flow rate of refrigerant into the reactor cooling jacket, to ensure that the entire process is isothermal. It was found that by varying the stirrer speed, it is possible to change the particle size and hence the molecular weight distribution of polyvinyl chloride. The developed neural network was tested. The obtained results have minimal error and are close to the real values, from which we can conclude that the network is trained correctly and the dependence between the data is found. **Conclusion.** Dependencies linking physicochemical parameters of the technological process with the design features of the apparatus have been established. To maintain the quality of PVC, in particular the appropriate molecular weight distribution, a neural network (a cascade network with direct signal propagation and reverse error propagation, consisting of ten sigmoidal neurons in the hidden layer and two linear neurons in the output layer) was developed in MATLAB environment. The network was trained on a sample and tested on test values, which showed that the network predicts the outcome of the process with minimal tolerable error, with other parameters unchanged.

KEYWORDS: polyvinyl chloride, nanocomposite, neural network, polymerization, nanotechnology.

FOR CITATION: Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S. Application of polyvinyl chloride for nanocomposites (analysis and optimization of quality indicators). *Nanotechnology in construction*. 2023; 15 (6): 519–530. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-519-530>. – EDN: WRQEQL.

INTRODUCTION

Polyvinyl chloride (PVC) has found widespread use in the construction industry due to its versatile properties and relatively low cost. PVC is a type of polymer that is composed of repeating vinyl chloride monomer links. In recent years, the characteristics and properties of PVC have been significantly improved using nanotechnology, making it an even more sought-after material for construction.

The use of nanotechnology involves modifying the structure of the material at the nanoscale, which ranges

in size from approximately 1 to 100 nanometers. Modification of PVC using nanotechnology allows to increase mechanical strength, durability and resistance to ultraviolet radiation and chemicals. This makes it a sought-after material for construction products that must withstand the negative effects of environmental parameters (temperature difference, humidity, UV radiation).

The application of nanotechnology of PVC composites in construction is promising and relevant. Nanocomposites are materials that contain small nanoparticles of other materials, such as clay or carbon nanotubes, which

are dispersed throughout the PVC matrix. The nanoparticles also help to improve the mechanical properties of PVC, making it stronger, more elastic.

Another example is the use of PVC nano-coatings, which can protect building materials from corrosion, weathering and other forms of degradation. These coatings also improve the appearance of PVC surfaces, making them more aesthetically pleasing.

The grade of PVC can affect the properties of nanocomposites, such as their mechanical, thermal and electrical properties. Different PVC grades can have different molecular weights, degree of branching and chemical composition, which can affect the compatibility of PVC and nanofillers, as well as the dispersion and interfacial interactions within the nanocomposites. Therefore, it is important to obtain the appropriate grade of PVC and select the processing conditions to optimize the performance of nanocomposites.

The stage of vinyl chloride (VC) polymerization by suspension method is an important industrial process of polyvinyl chloride (PVC) production. To date, modeling of this process has become a hot topic of research in the field of polymer property management. Models developed for the polymerization process that determine the polymer properties are usually based on the use of computational tools and methods such as molecular dynamics simulations, Monte Carlo methods and finite element methods.

The current state of the problem of modeling the process of VC polymerization by suspension method is characterized by the lack of reliable and accurate models.

A number of studies have been devoted to the development of computational models of the polymerization process. However, the accuracy of these models is often limited due to incomplete or inadequate data or assumptions made. In addition, the complexity of the process and the number of variables involved make it difficult to accurately predict the performance of the polymerization reaction.

The most commonly utilized models for the polymerization process rely on Monte Carlo and finite element methods. These models have been employed to develop various techniques for simulating the polymerization process. However, their predictive accuracy regarding process parameters is constrained due to their reliance on assumptions and incomplete data.

In addition to the existing models, a number of new approaches to modeling the polymerization process have been proposed. For example, some researchers suggested using artificial neural networks to model the process. Other approaches included the use of machine learning algorithms and data mining techniques.

In general, the current state of the problem of modeling the process of VC polymerization by suspension method is characterized by the lack of sufficiently reliable and accurate models. This leads to the need for further research to develop more reliable and accurate models of the polymerization process.

Fig. 1 shows a simplified technological process for production of suspension PVC by industrial method without using additional steps. Polymerization of vinyl

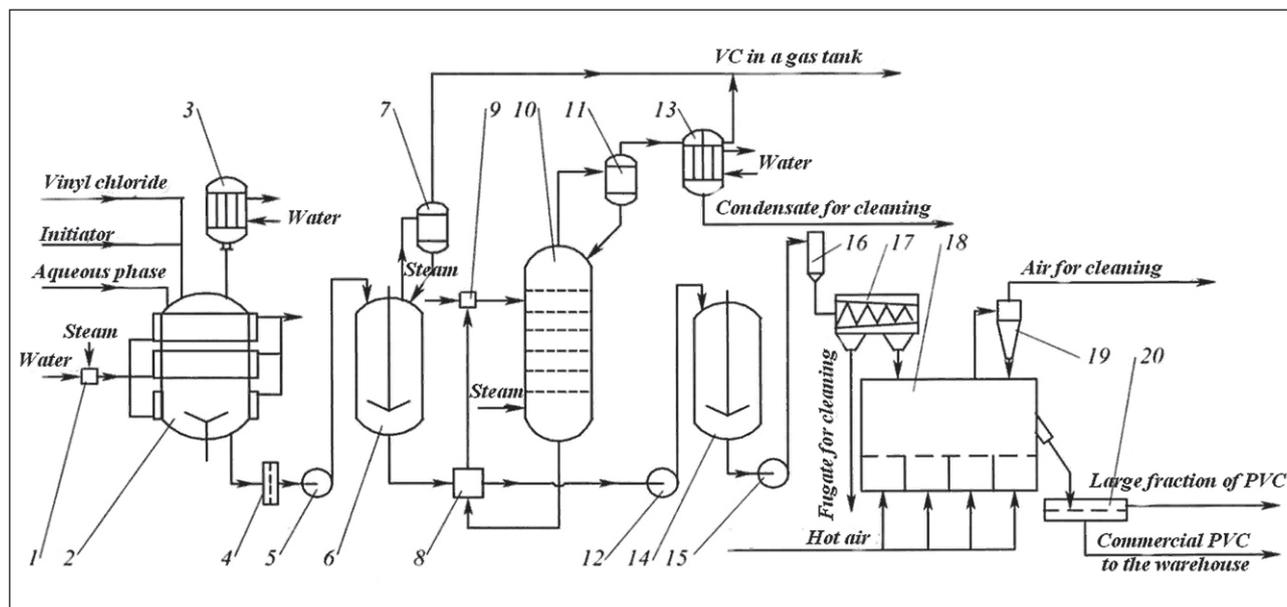


Fig. 1. **Technological scheme of polyvinyl chloride production:** 1, 9 – steam mixing heaters; 2 – reactor-polymerizer; 3 – reverse condenser-cooler; 4 – crust separator; 5, 12, 15 – pumps; 6 – capacitive degasser; 7, 11 – separators; 8 – heat exchanger; 10 – degassing column; 13 – condenser; 14 – PVC suspension collector; 16 – expander; 17 – centrifuge; 18 – fluidized bed dryer; 19 – cyclone; 20 – classifier

chloride takes place in a polymerization reactor using batch method. The reactor has a stirrer and a jacket for heating and cooling.

Desalinated water from the collection tank is used for pumping. In order to prevent the PVC slurry from entering the mechanical seal, the desalinated water is dosed using a special pump. The control system then starts loading the reactor and subsequently runs the process according to the recipe format. After the vinyl chloride has been dosed in the amount specified in the recipe, the reactor begins to heat up to the temperature specified in the regulations. When the set temperature is reached, the cooling time sensor is triggered. At the same time, a valve in the pipeline supplying the pre-cooled water to the suction pump is fully opened. Cooling water is fed into the reactor jacket, which displaces the hot water and the reactor is brought to the set temperature by the control system. The polymerization process is then started. When the set time has elapsed, the control system adjusts and maintains the set temperature in the reactor. A control valve, which is installed on the pipeline supplying the direct pre-water circuit, maintains the temperature during the entire polymerization process. If the temperature deviation from the set temperature is $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, an alarm is sounded at the operator's workstation. If the set temperature limit is exceeded, the control system activates the corresponding alarm or automatically adjusts the reactor operating parameters to maintain the set pressure at the required level. When the specified amount is reached, polymerization is completed. Subsequently, additional polymerization starts, which is accompanied by a time countdown. If there is no gradual decrease in pressure in the reactor, it also switches to the process of additional polymerization. The latter can be carried out either when the reactor is heated or without heating in the presence of a polymerization temperature, which is reached as a result of heat generation during polymerization. After the polymerization is completed, the slurry is pumped from the reactors to the degassers by means of pumps through filters.

A two-stage degassing process is used to remove gas from the PVC suspension. First, overpressure of VC is released in vessel degassers, and then degassing takes place in column-type apparatuses. Simultaneously with discharge of slurry from the reactors, vinyl chloride is blown from the degasser into the gas holder, where the gas is separated from PVC particles by means of an abseiler. The water from the abseiler is periodically returned to the degasser and the discharge is monitored using a sight glass. The slurry drain line from the abseiler is piped to the abseiler for flushing and to prevent clogging of the slurry drain line. VC blowdown is considered to be completed when the pressure in the degasser reaches a value not exceeding 0.02 MPa (0.2 kgf/cm²).

From the degasser, the PVC slurry passes through a filter and is continuously pumped to the degassing column. The amount is kept constant by control valves, depending on how many reactors are operating.

Steam, which is fed from the top of the degassing column to the bottom, passes through the holes in the plates, enriching with vinyl chloride. A mixture of gaseous vinyl chloride, which is a hot slurry coming out of the cube portion of the column, passes through the heat exchanger. Both the mixture and the water vapor, which comes from the head end of the column, are fed to the abseiler, where polyvinyl chloride particles that have been carried away by the gas are separated.

When the PVC is separated and dried, the separated slurry is continuously transported from the cube section of the column by a pump. At the same time, the slurry is cooled to the set temperature in a spiral heat exchanger. The slurry is then fed to the column or to another heat exchanger, which is cooled with recycled water.

The PVC slurry, which does not exceed a temperature of 85°C, after degassing, is fed through a pipeline to a heat exchanger to separate the crust from the slurry. Using a centrifugal pump, through a strainer installed in the discharge line and through an expander, the PVC suspension is fed to the centrifuge. The pump runs continuously. After the centrifuge, the PVC with a certain moisture content enters the disintegrator. The mother liquor coming out of the centrifuge is checked for PVC content and is directed by gravity through a pipeline to one of its collectors. If necessary, a centrifugal pump directs the matte either to the polymerization stage or to the flushing of equipment and pipelines.

In "fluidized bed" dryers, the wet PVC undergoes drying.

After the centrifugation process, the wet PVC products with a certain moisture content are sent to the disintegrator to break up the lumps formed. The products are then directed to the feed area of the dryer. It is located in the first section of the drying equipment, between the horizontal pipes, which are built-in heat exchangers. From below, through the distribution grid, hot air is supplied, as a result of which PVC products form a boiling layer. The heat supply for drying is not only by means of hot air, but also through the surface of the built-in heat exchangers, which are heated by hot water. The air enters the lower part of the dryer at a temperature of 90°C through the air distribution grille. In order to maintain a constant and sufficiently turbulent fluidized bed of products in the dryer, the air supply is controlled within predetermined values. The air flow rate is kept stable. The product in the dryer is dried until the required moisture content is reached. The dry PVC is then discharged from the dryer using vibrating screens. If necessary, the finished PVC product is analyzed for moisture and vinyl chloride content at the outlet of the dryer.

The air accompanying the PVC powder is fed into the cyclone hopper through a tangential inlet. In the cyclone, the PVC dust particles are separated from the air and then conveyed to the vibrating screen through a disk gate and sluice feeder. The sieved product fraction is directed to the pneumatic pump for further transfer to the silo.

When the PVC screening hopper is full, coarse particles from the process strings are transferred to the silos through a sluice feeder using a pneumatic pump and air pneumatic conveying.

In the process of vinyl chloride polymerization in the reactor, isothermal mode is used. This means that the temperature remains constant during the reaction and is controlled within specified limits (50 to 72°C), depending on the desired degree of polymerization. This approach is particularly important if the concentration of the polymerization initiator is changed, as it can affect the thermal characteristics of the reaction.

To provide the necessary conditions under which the time-varying heat must be dissipated, heat exchange devices such as a jacket and a return condenser are used. The polymerization reaction generates heat that must be efficiently dissipated to maintain a stable temperature. The jacket surrounds the reactor and is cooled by the chilled water, which takes up some of the heat. A special reverse condenser is used to cool and condense the vaporizing vinyl chloride in the reactor, which effectively removes excess heat during the time of maximum heat release.

The presence of such heat exchangers allows to effectively regulate the temperature in the reactor and provide the necessary conditions for the polymerization process when changing the initiator concentration or other process parameters.

One of the main characteristics of the quality of the resulting PVC is the molecular weight distribution of PVC particles, which in turn depends on temperature. As the temperature increases, the average molecular weight of the particles decreases, resulting in a broader molecular weight distribution. This can be explained by the fact that higher temperatures cause more chain breaks in the polymer molecules, resulting in a larger number of smaller particles. In addition, higher temperatures can cause chain breaks, which can also lead to a wider molecular weight distribution. Thus, higher temperatures tend to reduce the average molecular weight of the polyvinyl chloride particles and result in a broader molecular weight distribution.

Neural networks can be used to study the process of vinyl chloride suspension polymerization. Neural networks are powerful computational tools that can be used to analyze complex nonlinear relationships between various input and output data. Using a neural network, specific parameters affecting the polymerization process such as temperature, acid concentration, monomer concentration, and stirring rate can be determined. The

neural network can also be used to develop a model that accurately predicts properties of the resulting polymer, such as molecular weight distribution. Such a model can be used to optimize the polymerization process and obtain the desired properties of the final product.

There are various programs for creating neural networks, some popular ones include TensorFlow, Keras, PyTorch, Caffe and Theano, Matlab.

Matlab is a powerful tool in the education of engineering students. This programming language, developed by MATLAB, provides a high-level programming environment for performing technical computations, visualization, and data analysis. Its wide applications in engineering, physics, and mathematics make MATLAB a popular choice among students studying these fields (Figure 2).

There are the following types of neural networks:

1. Competing network: a type of unsupervised network in which neurons compete with each other for activation based on input signals. It is used for clustering and pattern recognition.

2. The forward and backward propagation cascade network is a supervised neural network used for model training. It consists of several hidden layers and is used in image and speech recognition tasks.

Forward propagation is from the input layer to the output layer, where each neuron in a layer passes its output to the next layer. Back propagation of the error is used to correct weights and optimize the model. The errors are compared to the expected results and the feedback signal propagates back through the network to update the weights of the neurons.

This neural network architecture allows the model to be trained on a large amount of labeled data and significantly improves its recognition and classification ability.

3. Back propagation Elman network: a type of recurrent neural network that can store and process sequential data. It is used for speech recognition and time series prediction.

4. Network with forward signal propagation and backward error propagation: a supervised forward-linked network that uses backward error propagation to train a model. It is used for classification and regression tasks.

5. Delayed back propagation network: a type of recurrent neural network that can process input signals with time delays. It is used for speech recognition and pattern recognition.

6. Generalized regression network. A type of neural network used for regression analysis. It uses one hidden layer and can handle multiple input and output variables.

7. Hopfield network: a type of associative memory network that can store and recall patterns. It is used to recognize images and patterns.

8. Linear layer (creation): a type of neural network used for linear regression problems. It uses one hidden layer and can handle multiple input and output variables.

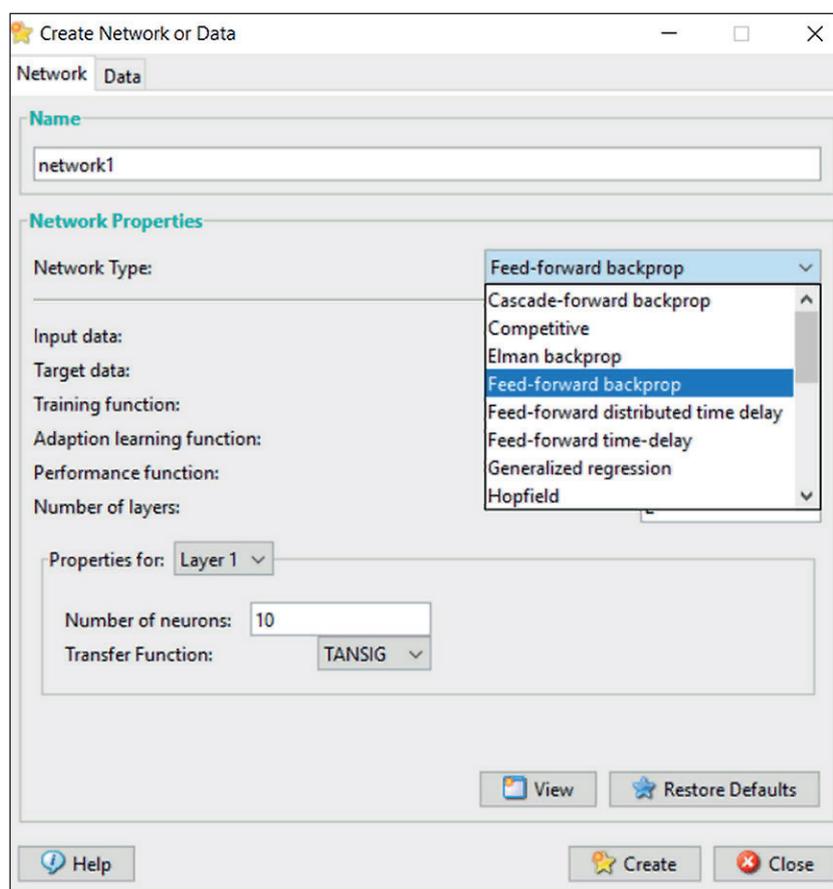


Fig. 2. Definition of neural network view in Matlab

METHODS AND MATERIALS

For mathematical calculation of technological parameters that cannot be directly measured, we analyzed literature sources on the process under consideration and established appropriate relationships between empirical data in accordance with the basic laws of thermodynamics and mass transfer processes [1–6].

The study applied neural network method to describe the process of vinyl chloride polymerization by suspension method. To solve this problem, a cascade network with forward propagation of the signal and backward propagation of the error was used. There are ten sigmoid neurons in the hidden layer of the network and two linear neurons in the output layer.

It is a type of learning algorithm with a teacher used to train artificial neural networks. The cascaded back propagation algorithm is used to improve the performance of the standard forward-linked back propagation algorithm by using a multi-stage architecture. The multi-stage architecture is such that the output of one stage of the neural network is used as input to the next stage.

The cascade back propagation algorithm involves dividing the network into a number of subnets, with each

subnet trained separately. The output of each subnetwork is then fed as input to the next subnetwork. This process culminates in the final output of the neural network.

During training, the algorithm first performs a forward pass through the network to generate the predicted output. The difference between the predicted output and the expected output is then calculated and error gradients are computed with respect to each weight in the network. These gradients are then used to update the weights in each subnetwork.

A cascade network having forward signal propagation and backward error propagation, whose composition has ten sigmoid neurons in the hidden layer and two linear neurons in the output layer, can be described as follows:

The input layer accepts input data, which are attributes or characteristics of the task.

The hidden layer consists of ten sigmoid neurons. Each neuron accepts input signals and applies the sigmoid activation function to generate an output value.

The output layer consists of two linear neurons. Each neuron accepts outputs from the hidden layer and computes a linear combination with weights and bias without applying an activation function.

Direct signal propagation:

The input data is transmitted through the network from the input layer to the hidden layer and then to the output layer.

Each neuron in the hidden layer applies a sigmoid activation function to the input signals and generates an output value.

The output values from the hidden layer are passed to the neurons of the output layer without applying an activation function.

Reverse propagation of error:

- The error is calculated by comparing the output values of the network with the expected values based on the selected error function.
- The error propagates back through the network starting from the output layer using the error back propagation algorithm.
- The weights and offsets of the network are updated according to gradient descent and weight update rule to minimize the error.

Training and Optimization:

- The network is trained on the training dataset by repeating the forward and backward error propagation process.
- Hyperparameters such as learning rate and number of epochs can be customized for optimal results.
- After training, the network can be tested on a validation dataset and further on a test dataset to evaluate its performance.
- The cascaded forward back propagation algorithm has been shown to be effective in improving the accuracy

of neural networks, especially when the input data is noisy or when the input data is highly variable. In addition, the use of separate sub-networks can improve the computational efficiency of the algorithm because each sub-network can be trained independently of the others.

RESULTS

The process for producing the polyvinyl chloride discussed herein is carried out at a constant temperature, which requires control of heat dissipation, which may vary over time depending on what the process composition, including the concentration of the polymerization initiator, will be.

As a result of these studies, the relationships between the change in heat flux that occurs during the polymerization reaction and the change in initiator concentration with time were found (Fig. 3).

$$Q\left(\frac{Bm}{M^2}\right) = \sum_{i=0}^6 A_i \cdot t^i, \quad (1)$$

where t is time, h ; A_i are the coefficients of the equation determined by the ratios $A_0 = -0,5962+6,4758Z$; $A_1 = 1,7535-11,4222Z$; $A_2 = -0,5806+8,7025Z$; $A_3 = 8,64 \cdot 10^{-2}-3,4579Z$; $A_4 = -4,6 \cdot 10^{-3}+0,748Z$; $A_5 = -8,23 \cdot 10^{-2}Z$; $A_6 = 3,6 \cdot 10^{-3}Z$.

$Z = C-C_0/C_1-C_0$, $C_1 = 0,1\%$ wt. of BX, $C_0 = 0,065\%$ wt. of BX.

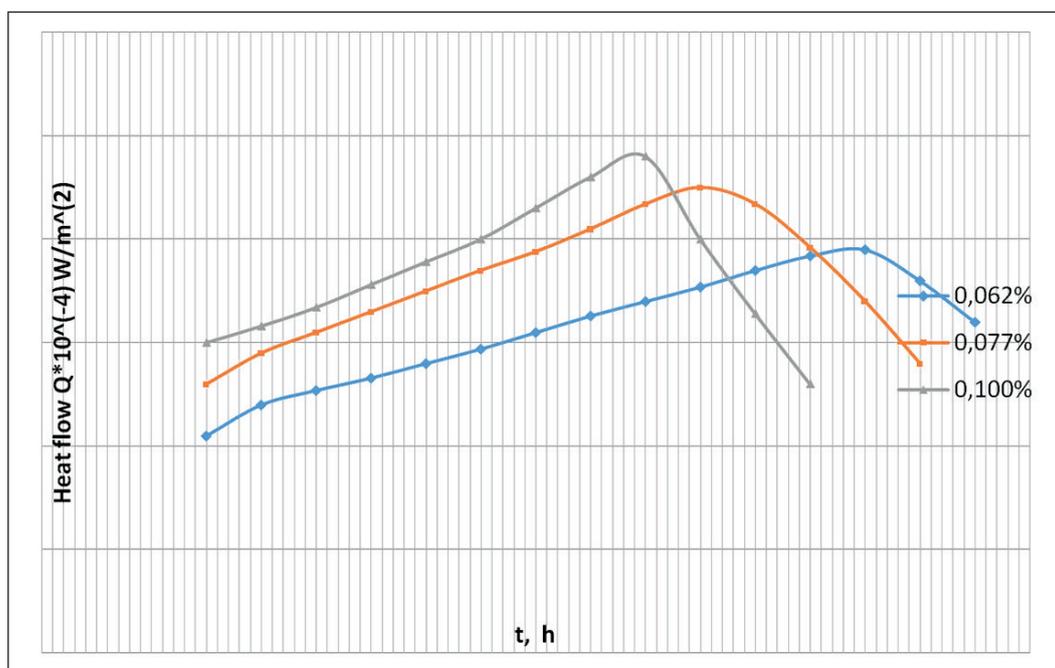


Fig. 3. Dependence of heat flux on polymerization time at concentrations of initiator (triganox): 0.065% wt. of VC, 0.077% wt. of VC and 0.10% wt. of VC

These dependencies are used to control the refrigerant flow rate in the reactor cooling system to ensure a constant temperature during the process..

$$G_V(t) \left[\frac{M^3}{\text{час}} \right] = G_{V0} K \left(\sum_{i=0}^6 A_i t^i \right), \quad (2)$$

where $K = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{W}$.

In the polymerization process, the temperature of vinyl chloride polymer-monomer particles, denoted as $T(r)$, differs from the temperature of the reaction medium, denoted as T_c . From the solution of the steady-state heat conduction equation for spherical polymer-monomer particles with radius R and heat transfer coefficient λ , it follows that the temperature is determined by the following relation:

$$T(r) = T_c + \frac{QR}{2\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), 0 \leq r \leq R. \quad (3)$$

It can be seen that the temperature reaches the maximum value in the center of the particle at $r \rightarrow 0$. The deviation of the temperature inside the droplet from the temperature of the reaction mixture can reach 10°C , which affects the molecular weight distribution of the polymer.

Based on the dependence of the polymer-monomer particle sizes on the mixing intensity and properties of the emulsion stabilizer [1] and analysis of empirical data, a formula was developed that establishes the relationship between chemical-technological parameters and the design features of the polymerization reactor (Fig. 5).

$$d = 0.064 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \cdot \frac{1+2\Phi}{n^{1,2} d_m^{0,8}}, \quad (4)$$

where $We = \rho n^2 d_m^3 / \zeta$ – is the Weber number, Φ is the volume fraction of the dispersed phase in the emulsion, ρ – is the density, n , d_m – are the rotational speed and diameter of the stirrer, respectively, ζ is the surface tension coefficient.

Generalizing the obtained dependences, we can conclude that by changing the stirrer rotation frequency, it is possible to change the particle size and, consequently, the molecular-mass distribution of polyvinyl chloride.

Models at conceptual, topological and structural levels have been developed to improve the quality of the output product in the vinyl chloride polymerization process.

The model at the conceptual level is built with division of the selected parameters into input and output parameters. It contains initial information for further calculation, which is presented in Table 1.

This will help to optimize the polymerization process and obtain a polymer with a homogeneous molecular weight, which, in turn, will improve the quality of the product.

A Cascade-forward backprop neural network consisting of ten sigmoidal neurons in a hidden layer was chosen to solve this task (Fig. 7).

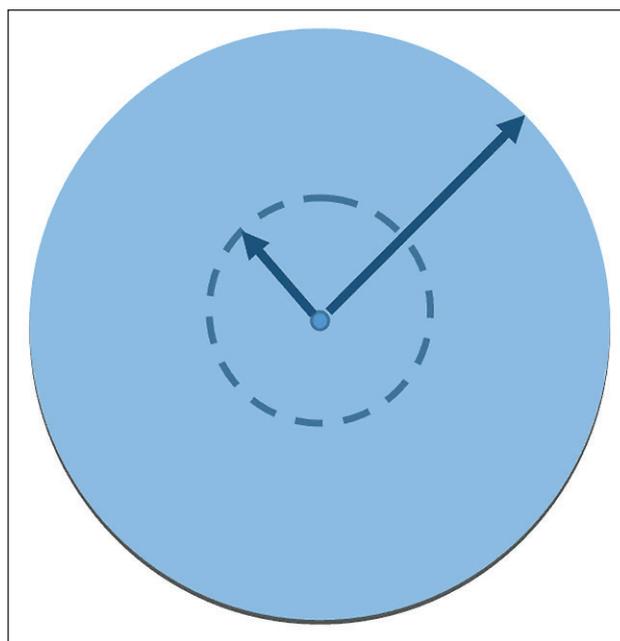


Fig. 4. Spherical polymer-monomer particle of radius R



Fig. 5. Polymerization reactor

Table 1
 Input and output parameters of the polymerization reactor

Technological parameters	Variable
Consumption of mortar B72	F1
Solution pressure B72	P1
Solution temperature B72	T5
Methocel solution flow rate	F2
Methocel solution pressure	P2
Methocel solution temperature	T4
Initiation agent consumption – Triganox WD-100	F4
Initiator pressure	P4
Initiator temperature – Triganox WD-100	T7
Desalinated water consumption	F5
Pressure of desalinated water	P7
Desalinated water temperature	T2
Vinyl chloride temperature	T3
Vinyl chloride pressure	P8
Vinyl chloride consumption	F3
Agidol solution consumption	F6
Soda consumption	F7
Temperature of sodium bicarbonate	T6
Polyvinyl chloride suspension pressure	P6
PVC suspension temperature	T1

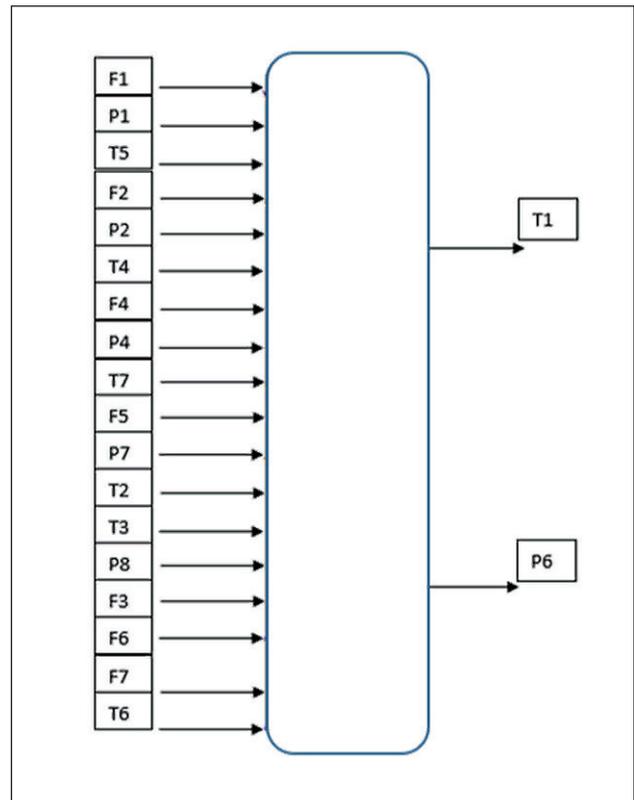


Fig. 6. Conceptual model for neural network development

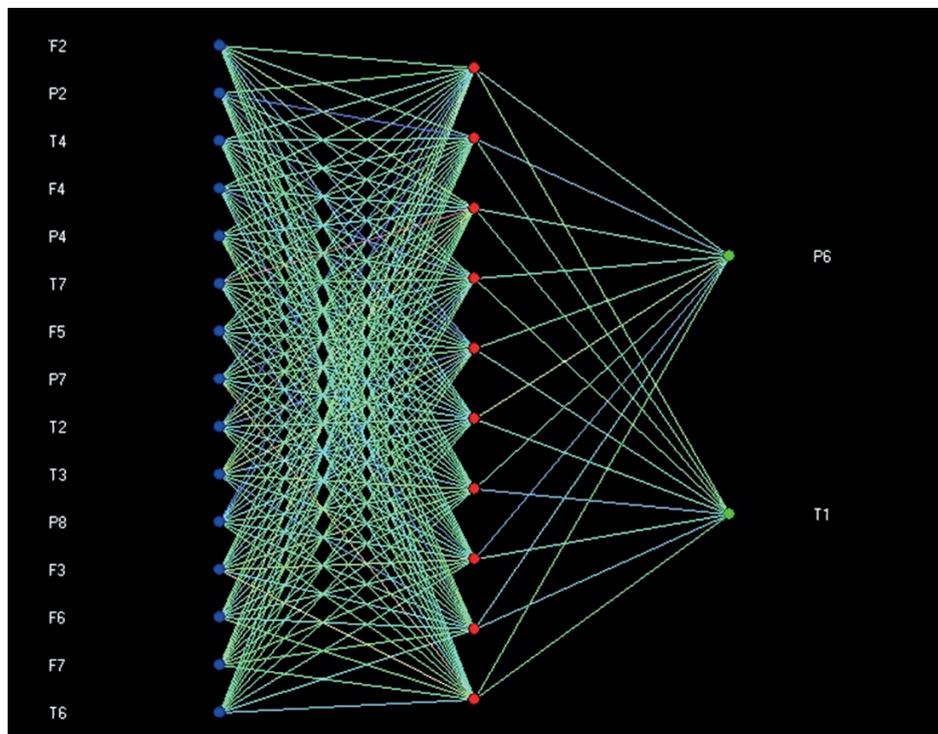


Fig. 7. Conceptual model of a neural network for regulating technological parameters with ten sigmoidal hidden layer neurons

To design an artificial neural network, we used the nntool tool in Matlab program, which allows creating and customizing neural networks in the graphical environ-

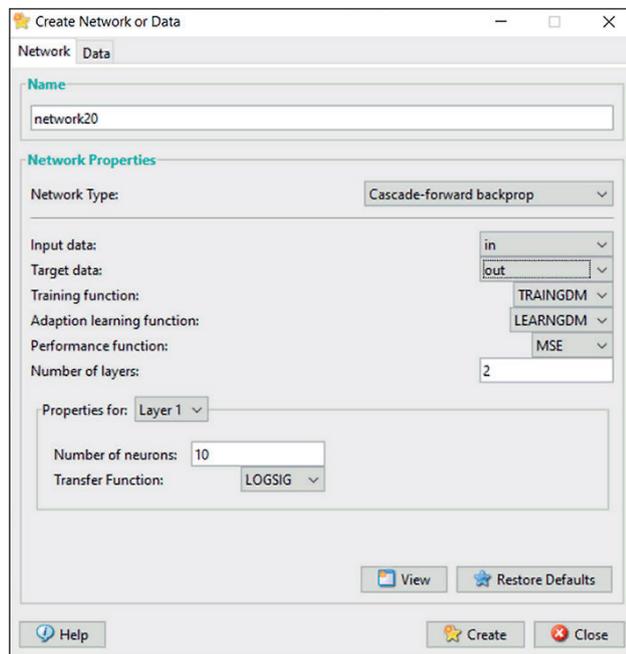


Fig. 8. Creation of an artificial neural network

ment Neural Network Toolbox. In the graphical interface the type of neural network Cascade-forward backprop is selected (Fig. 8). Number of neurons in input, hidden and output layers. Activation function for each layer is selected. The network is trained.

DISCUSSION

Verification data can be used to evaluate the results and verify the output values of neural networks. The “Simulate” tab in the neural network setup window allows you to feed input values and analyze the corresponding output values.

Table 2, containing test data, is used by the tool to evaluate the performance of the neural network. By feeding input values from Table 2 into the simulation window, the obtained output values are compared with the expected results, which makes it possible to evaluate the accuracy and reliability of the neural network in recognizing and classifying data.

The obtained results have minimal error and are close to the real values, which indicates that the network is trained correctly and the dependence between the data is found.

Thus, the developed neural network can be used to predict the molecular weight distribution of PVC particles.

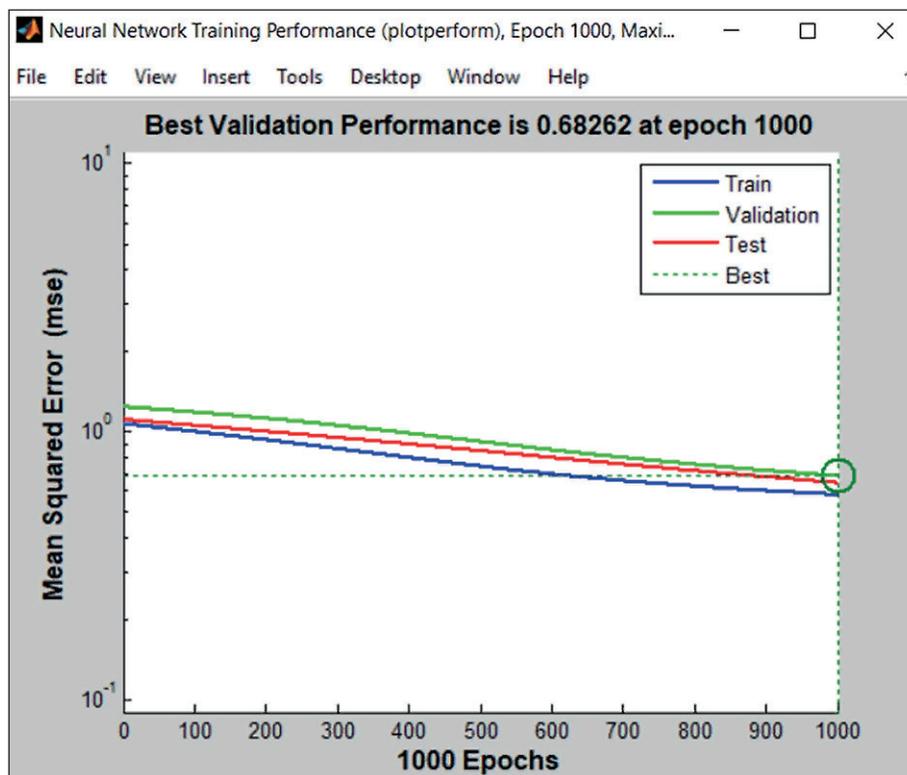


Fig. 9. Mean square error

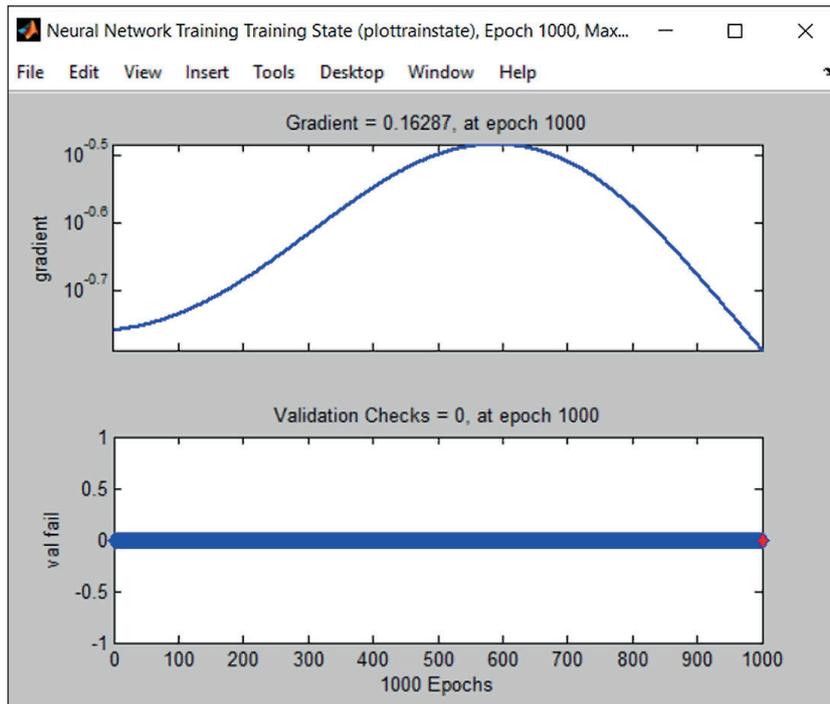


Fig. 10. Network training graphs

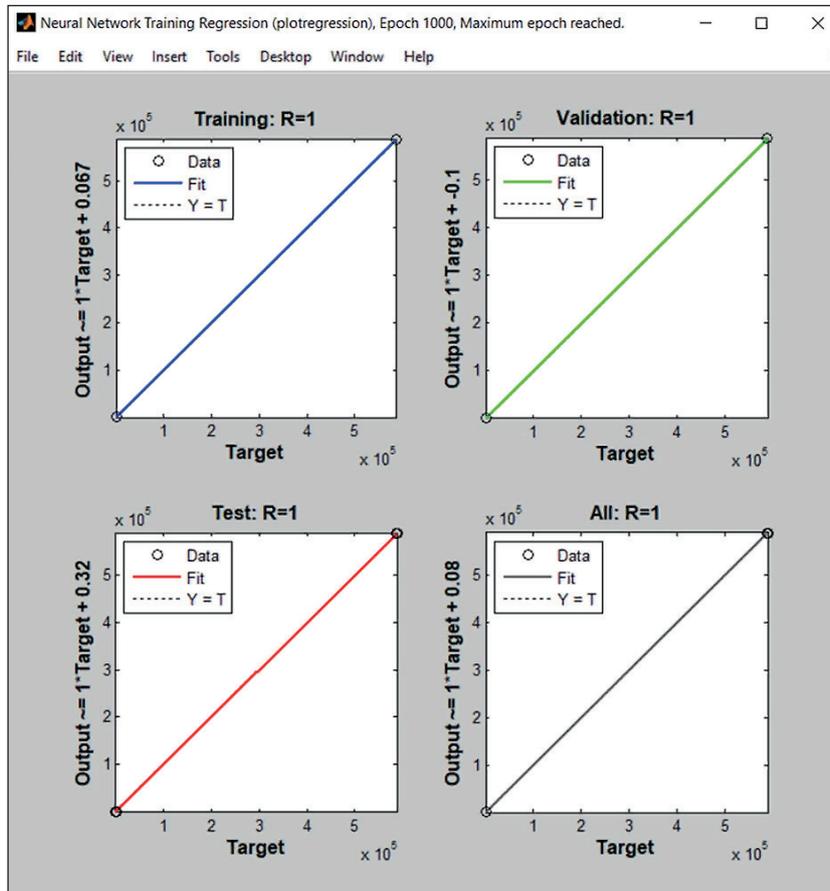


Fig. 11. Linear regression graph

Table 2
Neural network verification

Input values		
	Group1	Group 2
F2, kg/h	230.11	232.05
P2, Pa	872796.85	872797.11
T4, C	24.68	24.72
F4, kg/h	74.73	75.91
P4, Pa	254973.62	254974.09
T7, C	−22.30	−22.34
F5, kg/h	29005.33	29000.10
P7, Pa	200000.61	200000.95
T2, C	95.63	95.18
T3, C	38.15	33.86
P8, Pa	591000.05	524078.65
F3, kg/h	26018.05	26004.93
F6, Па	49032.10	49032.24
F7, kg/h	5.50	5.47
T6, C	49.00	50.41
Output values		
Check values		
P6, Pa	588399.02	588397.64
T1, C	66.98	65.81
The values obtained		
P6, Pa	588400	588400
T1, C	66.74	65.23

CONCLUSION

The following results were obtained through the research.

The dependence of heat flux on initiator concentration was established and a mathematical formula was developed that allows to regulate the refrigerant flow rate in the reactor cooling system to maintain a constant temperature and ensure isothermal process. This formula is a tool for optimal control of the reactor thermal regime and ensuring its stable operation.

It was found that an increase in temperature leads to a broadening of the molecular weight distribution spectrum towards lower molecular weights.

The formula determining the relationship between chemical-technological parameters and design features of the polymerizer reactor is obtained. It is established that by changing the stirrer rotation frequency, it is possible to change the particle size and, consequently, the molecular-mass distribution of polyvinyl chloride.

The development of a neural network to describe and predict the process of vinyl chloride polymerization by suspension method is reasonable. A neural network using a cascaded forward and backward propagation architecture, ten sigmoidal neurons in the hidden layer and two linear neurons in the output layer was developed to ensure the quality of PVC including appropriate molecular weight distribution. The development was carried out in MATLAB environment.

Training on a sample and verification on test values were carried out, which showed that the network predicts the outcome of the process with the minimum tolerable error with other unchanged parameters. This, in turn, will allow to control and optimize the technological process and obtain products of a given quality.

REFERENCES

1. Ulyanov V.M., Gutkovich A.D., Shebyrev V.V. Technological equipment of polyvinyl chloride suspension production: Monograph. N. Novgorod. 2004. 253 c.
2. Preparation and properties of polyvinyl chloride / Edited by E.N. Zilberman. Zilberman. Moscow: Khimiya, 1968. 432 c.
3. Mathematical methods of modeling of polymerizer reactor for the process of polymerization of vinyl chloride. Kovalenko, Y.F., Shulaeva, E.A. AIP Conference Proceeding, 2022, 2467, 060023.
4. Mathematical methods for modeling of the process of diaphragm electrolysis Shulaeva, E.A., Kovalenko, Y.F., Serebryakov, E.A. AIP Conference Proceedings, 2022, 2467, 060012.
5. Modeling of the process of electrolysis production of caustic, chlorine and hydrogen. Shulaeva, E.A., Shulaev, N.S., Kovalenko, J.F. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 803(1), 012148.
6. Simulation and modeling software in chemical technology: Polymerization of vinyl chloride. Shulaeva, E.A., Kovalenko, Y.F., Shulaev, N.S. Advanced Materials Research, 2014, 1040, pp. 581–584.
7. Ksandrov N.V. Resource saving in chemical technology: textbook for universities / N.V. Ksandrov, O.R. Ozhogina, A.A. Peretrutov. N. Novgorod. 2014. 101 p.

8. Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S. Modeling of molecular-mass distribution at obtaining polyvinyl chloride by suspension method. Bulletin of young scientist of UGNTU. 2016. № 1. P. 128–131.
9. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Y.F. Computer modeling of technological processes. Butler Communications. 2018. T. 54. № 4. P. 40–55.
10. Muravyeva E.A., Kazantsev R.V., Podlesky D.V. Development of neural network to control the process of alkaline washing of isopentane-isoprene-toluene fraction using a virtual analyzer. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology. 2022. № 2. P. 120–137.
11. Calculations of fluidized bed apparatuses / Edited by I.P. Mukhlenov, B.S. Sazhin, V.F. Frolov. Publisher: “Khimiya”, Leningrad Branch, 1986. 352 p.
12. Shulaeva E.A., Kovalenko Y.F., Serebryakov E.A. Modeling of diaphragm electrolysis process. Natural and Technical Sciences. 2021. № 8 (159). P. 190–192.
13. Shulaeva E.A., Daminev R.R., Islamutdinova A.A. Features of creating simulation and modeling complexes of common petrochemical processes on the example of the process of vinyl acetate synthesis // Electrotechnical and information complexes and systems. 2013. V. 9, № 4. 127–134.
14. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F. Mathematical modeling and analysis of parameters of technological process of diaphragm electrolysis. Natural and Technical Sciences. 2022. № 7 (170). P. 214–215.
15. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Y.F. Modeling of electrolyzer parameters in the production of caustic soda, chlorine and hydrogen. Neftegazovoe delo. 2016. V. 14. № 4. P. 103–107.
16. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride. Advanced Materials Research Vol. 1040 (2014), pp. 581–584.
17. Shtovba S.D. Ensuring accuracy and transparency of Mamdani fuzzy model when learning from experimental data // Problems of management and informatics. – 2007. – № 4. – P. 102–114.
18. Yakhyayeva G.E. Fuzzy sets and neural networks: textbook. Moscow: Binom. Laboratory of Knowledge, 2008. 316 p.
19. Galushkin A.I. Neural Networks: Fundamentals of Theory. MOSCOW: GLT, 2010. 496 p.
20. Galushkin A.I., Tsypkin Y.Z. Neural networks: history of theory development: textbook for universities. Moscow: Alliance, 2015. 840 p.
21. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems. Moscow: RiS, 2013. 384 p.
22. Shiryaev V.I. Financial Markets: Neural Networks, Chaos and Nonlinear Dynamics. Moscow: Librocom CD, 2016. 232 p.
23. Redko V.G. Evolution, Neural Networks, Intelligence: Models and Concepts of Evolutionary Cybernetics. Moscow: Lenand, 2017. 224 p.

AUTHORS INFORMATION

Yulia F. Kovalenko – assistant, department of Automated technological and information systems, Institute of chemical technologies and engineering of Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, julia_str_ak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0661-2804>

Ekaterina A. Shulaeva – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, associate professor of the department Automated technological and information systems, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, eshulaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8108-7387>

Nikolay S. Shulaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Informatics, Mathematics and Physics, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, nshulayev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3595-6948>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yulia F. Kovalenko – processing and analysis of experimental data using machine learning methods; graphical and tabular presentation of research results; writing the original text of the article.

Ekaterina A. Shulaeva – literature review; conducting experimental work; collecting and systematizing experimental data; drawing final conclusions.

Nikolay S. Shulaev – scientific supervision; conceptualization and development of research methodology; analysis of research results; writing the original text of the article; drawing up the final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

The article was submitted 04.10.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 03.11.2023.

Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества)

Юлия Фанильевна Коваленко* , Екатерина Анатольевна Шулаева , Николай Сергеевич Шулаев 

Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Республика Башкортостан, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Применение нанокompозитов в различных отраслях промышленности в последние годы увеличилось благодаря их уникальным свойствам и эксплуатационным характеристикам. Однако оптимизация качественных показателей нанокompозитов остается сложной задачей из-за сложного взаимодействия между компонентами. В работе представлен обзор методов, используемых для анализа и расчета показателей качества нанокompозитов с использованием ПВХ в качестве основного материала. **Методы и материалы.** Для математического расчета технологических параметров, не поддающихся прямому измерению, были проведены анализ литературных источников по рассматриваемому процессу и установление соответствующих зависимостей между эмпирическими данными в соответствии с основными закономерностями термодинамики и процессов массообмена. В ходе исследования применен метод нейронных сетей для того, чтобы описать процесс полимеризации винилхлорида, осуществленного суспензионным методом. Для решения данной проблемы была применена каскадная сеть, имеющая прямое распространение сигнала и обратное распространение ошибки. Состав сети: в скрытом слое – десять сигмоидных нейронов, в выходном слое – два линейных нейрона. **Результаты и обсуждения.** В ходе проведения исследований было установлено, что при полимеризации тепловой поток изменяется с течением времени в зависимости от уровня концентрации инициатора. В дальнейшем полученные зависимости могут использоваться при регулировании расхода хладагента в охлаждающую рубашку реактора, для обеспечения изотермического выполнения всего процесса. Было установлено, что, изменяя частоту вращения мешалки, можно изменять размер частиц и, следовательно, молекулярно-массовое распределение поливинилхлорида. Разработанная нейронная сеть была протестирована. Полученные результаты имеют минимальную погрешность и близки к реальным значениям, из чего можно сделать вывод, что сеть обучена правильно и зависимость между данными найдена. **Заключение.** В ходе исследований установлены зависимости, связывающие физико-химические параметры технологического процесса с конструктивными особенностями аппаратуры. Для поддержания качества ПВХ, в частности, соответствующего молекулярно-массового распределения, была разработана нейронная сеть (каскадная сеть, имеющая прямое распространение сигнала и обратное распространение ошибки, состоящая из десяти сигмоидных нейронов в скрытом слое и двух линейных нейронов в выходном слое) в среде MATLAB. Проведены обучение по выборке и проверка на тестовых значениях, которая показала, что сеть с минимальной допустимой погрешностью предсказывает исход процесса при прочих неизменных параметрах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поливинилхлорид, нанокompозит, нейронная сеть, полимеризация, нанотехнология.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С. Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества) // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 6. С. 519–530. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-519-530>. – EDN: WRQEQL.

ВВЕДЕНИЕ

Поливинилхлорид (ПВХ) нашел широкое применение в строительной отрасли благодаря своим универсальным свойствам и относительно низкой стоимости. ПВХ представляет собой тип полимера, который состоит из повторяющихся звеньев моно-

меров винилхлорида. В последние годы с использованием нанотехнологий были значительно улучшены характеристики и свойства ПВХ, что сделало его еще более востребованным материалом для строительства.

Использование нанотехнологий включает в себя изменение структуры материала на наноуровне, размер которого составляет примерно от 1 до 100 на-

нометров. Модификация ПВХ с использованием нанотехнологий позволяет повысить механическую прочность, долговечность и устойчивость к ультрафиолетовому излучению и химическим веществам. Это делает его востребованным материалом для строительных изделий, которые должны выдерживать негативные влияния параметров окружающей среды (перепад температур, влажность, УФ излучение).

Перспективным и актуальным является применение нанотехнологий композитов ПВХ в строительстве. Нанокompозиты — это материалы, которые содержат небольшие наночастицы других материалов, таких как глина или углеродные нанотрубки, которые диспергированы по всей матрице ПВХ. Также наночастицы способствуют улучшению механических свойств ПВХ, делая его более прочным, эластичным.

Другим примером является использование нанопокровов ПВХ, которые могут защитить строительные материалы от коррозии, атмосферных воздействий и других форм деградации. Эти покрытия также улучшают внешний вид поверхностей из ПВХ, способствуют их более эстетичному восприятию.

Марка поливинилхлорида может влиять на свойства нанокompозитов, такие как их механические, термические и электрические свойства. Различные марки ПВХ могут иметь разную молекулярную массу, степень разветвленности и химический состав, что может влиять на совместимость ПВХ и нанонаполнителей, а также на дисперсию и межфазные взаимодействия внутри нанокompозитов. Поэтому важно получить соответствующую марку ПВХ и выбрать условия обработки, чтобы оптимизировать характеристики нанокompозитов.

Стадия полимеризации винилхлорида (ВХ) суспензионным методом является важным промышленным процессом производства поливинилхлорида (ПВХ). На сегодняшний день моделирование этого процесса стало актуальной темой исследований в области управления свойствами полимеров. Модели, разработанные для процесса полимеризации, определяющие свойства полимера, обычно основаны на использовании вычислительных инструментов и методов, таких как моделирование молекулярной динамики, методы Монте-Карло и методы конечных элементов.

Современное состояние проблемы моделирования процесса полимеризации ВХ суспензионным методом характеризуется отсутствием надежных и точных моделей. Ряд исследований был посвящен разработке вычислительных моделей процесса полимеризации. Однако точность этих моделей часто ограничена из-за неполных или неадекватных данных или сделанных допущений. Кроме того, сложность процесса и количество задействованных

переменных затрудняют точное прогнозирование проведения реакции полимеризации.

Наиболее широко используемые модели процесса полимеризации основаны на использовании методов Монте-Карло и конечных элементов. Эти модели использовались для создания различных методов моделирования процесса полимеризации. Однако эти модели ограничены в своей способности достаточно точно предсказывать параметры процесса из-за их зависимости от предположений и неполных данных.

В дополнение к существующим моделям предложен ряд новых подходов к моделированию процесса полимеризации. Например, некоторые исследователи предложили использовать искусственные нейронные сети для моделирования процесса. Другие подходы включали использование алгоритмов машинного обучения и методов интеллектуального анализа данных.

В целом, современное состояние проблемы моделирования процесса полимеризации ВХ суспензионным методом характеризуется отсутствием достаточно надежных и точных моделей. Это приводит к необходимости проведения дальнейших исследований по разработке более надежных и точных моделей процесса полимеризации.

На рис. 1 показан упрощенный технологический процесс получения суспензионного ПВХ промышленным способом без использования дополнительных этапов. Полимеризация винилхлорида происходит в реакторе для полимеризации при помощи периодического способа. Реактор имеет мешалку и рубашку для подогрева и охлаждения.

Для прокачивания используется обессоленная вода из сборника. Чтобы предотвратить попадание в торцевое уплотнение суспензии поливинилхлорида, подача обессоленной воды осуществляется дозировано при помощи специального насоса. Затем управляющая система начинает загрузку реактора и в дальнейшем ведет процесс согласно рецептурному формату. После того, как винилхлорид был дозирован в определенном в рецепте количестве, реактор начинает разогреваться до той температуры, которая указана в регламенте. Когда достигается установленная температура, происходит запуск датчика времени охлаждения. Параллельно на трубопроводе, подающем захоленную воду на всасывающий насос, происходит полное открытие клапана. В рубашку реактора подается охлаждающая вода, которая вытесняет собой горячую воду, вследствие чего реактор выводится управляющей системой на заданную температуру. Далее запускается процесс полимеризации. Когда установленное время истекло, управляющей системой осуществляется регулировка и поддержание заданной температуры в реакторе. Регулирующий клапан, который уста-

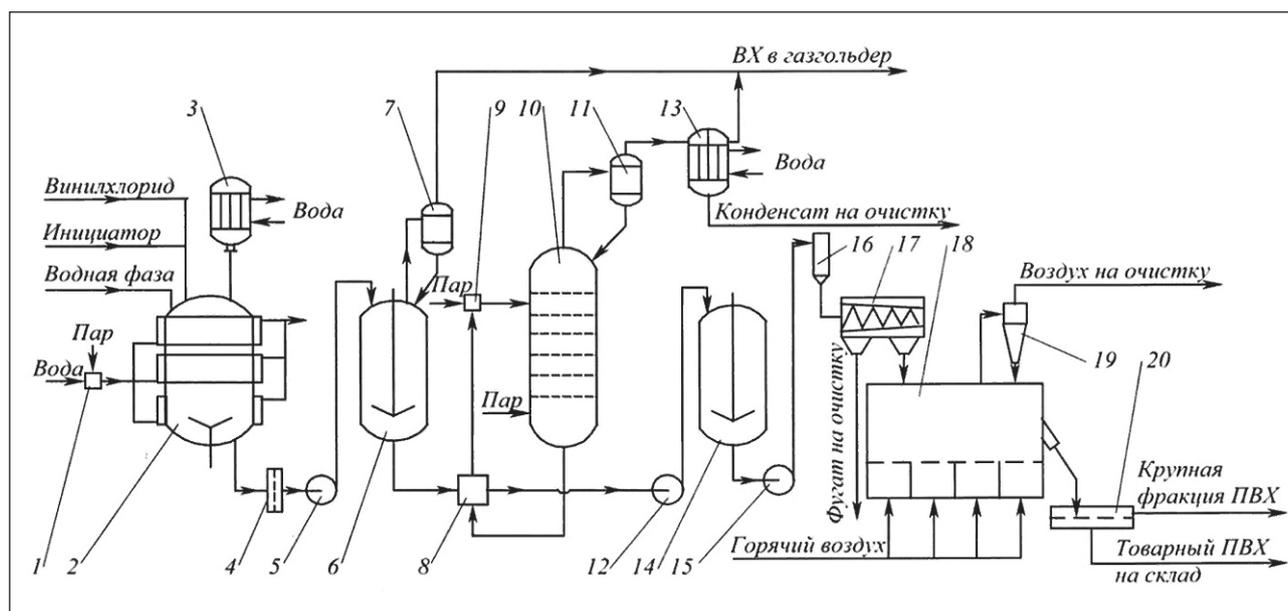


Рис. 1. Технологическая схема производства поливинилхлорида: 1, 9 – нагреватели смешительные паровые; 2 – реактор-полимеризатор; 3 – обратный конденсатор-холодильник; 4 – коркоотделитель; 5, 12, 15 – насосы; 6 – дегазатор емкостный; 7, 11 – сепараторы; 8 – теплообменник; 10 – колонна дегазации; 13 – конденсатор; 14 – сборник суспензии ПВХ; 16 – расширитель; 17 – центрифуга; 18 – сушилка кипящего слоя; 19 – циклон; 20 – классификатор

новлен на трубопроводе, подающем в контур прямой захлажденной воды, поддерживает температурный режим все время полимеризации. Если отклонение температуры от установленной составляет $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, на рабочем месте оператора раздается сигнал. При превышении установленной температурной границы система управления активирует соответствующий сигнал тревоги или автоматически корректирует параметры работы реактора для поддержания заданного давления на необходимом уровне. При достижении указанного количества происходит завершение полимеризации. Далее начинается дополимеризация, которая сопровождается временным отсчетом. В случае если не происходит постепенного снижения давления в реакторе, он также переходит на процесс дополимеризации. Последний может осуществляться как в случае разогрева реактора, так и без разогрева при наличии полимеризационной температуры, которая достигается в результате выделения тепла при полимеризации. После того как полимеризация завершается, суспензия с помощью насосов через фильтры подается из реакторов в дегазаторы.

Для удаления газа из суспензии ПВХ используется двухступенчатый процесс дегазации. Сначала происходит освобождение избыточного давления ВХ в емкостных дегазаторах, а затем происходит дегазация в аппаратах колонного типа. Одновременно с выгрузкой суспензии из реакторов начинается сдвка винилхлорида из дегазатора в газгольдер, где

происходит отделение газа от частиц ПВХ с помощью абшайдера. Вода из абшайдера периодически возвращается в дегазатор, и контроль за сливом осуществляется с помощью смотрового фонаря. Для промывки и предотвращения забивки трубопровода слива суспензии из абшайдера в него подведен трубопровод маточника. Сдвка ВХ считается завершённой, когда давление в дегазаторе достигает значения не более 0,02 МПа (0,2 кгс/см²).

Из дегазатора поливинилхлоридная суспензия проходит через фильтр и насосом постоянно подается на колонну дегазации. Ее количество поддерживается неизменным регулирующими клапанами в зависимости от того, сколько реакторов работает.

Пар, который подается из верхней части колонны дегазации в нижнюю, проходит через отверстия в тарелках, обогащаясь винилхлоридом. Через теплообменник проходит смесь газообразного винилхлорида, представляющая собой горячую суспензию, выходящую из кубовой части колонны. И смесь, и водяной пар, которые поступают из головной части колонны, подаются в абшайдер, где происходит отделение частиц поливинилхлорида, которые были унесены газом.

Когда происходит выделение и сушка поливинилхлорида, из кубовой части колонны, насосом постоянно перемещается отдегазированная суспензия. Одновременно в спиральном теплообменнике осуществляется ее охлаждение до установленной

температуры. Затем суспензия подается на колонну или в другой теплообменник, который охлаждается оборотной водой.

Суспензия поливинилхлорида, не превышающая температуру 85°C, после дегазации подается через трубопровод в теплообменник, чтобы отделить корку от суспензии. С помощью центробежного насоса через сетчатый фильтр, установленный на линии нагнетания, и через расширитель суспензия ПВХ подается на центрифугу. Насос работает непрерывно. После центрифуги поливинилхлорид с определенным содержанием влаги поступает в дезинтегратор. Маточник, выходящий из центрифуги, проверяется на содержание ПВХ и направляется самотеком через трубопровод в один из его сборников. Если это необходимо, то при помощи центробежного насоса маточник направляется или на стадию полимеризации, или на промывку оборудования и трубопроводов.

В сушилках «кипящего слоя» влажный ПВХ проходит сушку.

После процесса центрифугирования влажные изделия из ПВХ, имеющие определенное содержание влаги, направляются в дезинтегратор, чтобы раздробить образовавшиеся комки. Далее изделия направляются в зону питания сушилки. Она располагается в первой секции оборудования для сушки, между горизонтальными трубами, которые являются встроенными теплообменниками. Снизу, через распределительную решетку, подается горячий воздух, вследствие чего изделия из ПВХ образуют кипящий слой. Подача тепла для сушки осуществляется не только при помощи горячего воздуха, но и через поверхность встроенных теплообменников, нагреваемых горячей водой. Воздух через воздухораспределительную решетку поступает в нижнюю часть сушилки при температуре 90°C. Для поддержания постоянного и достаточно турбулентного кипящего слоя изделий в сушилке подача воздуха контролируется в рамках заранее заданных значений. Расход воздуха поддерживается стабильным. Продукт в сушилке высушивается до достижения необходимой влажности. Затем сухой ПВХ выгружается из сушилки с помощью вибрационных сит. При необходимости готовый продукт ПВХ на выходе из сушилки проходит анализ на содержание влаги и винилхлорида.

Воздух, сопровождающий порошок ПВХ, подается в бункер-циклон через тангенциальный ввод. В циклоне частицы пыли ПВХ отделяются от воздуха и затем поступают на вибрационное сито через дисковую затвор и шлюзовой питатель. Отсеянная товарная фракция направляется к пневмонасосу для последующей передачи в силос.

Когда бункер отсева ПВХ заполняется, крупные частицы с технологических ниток перекадываются

в силосы через шлюзовой питатель, используя пневмонасос и воздушный пневмотранспорт.

В процессе полимеризации винилхлорида в реакторе используется изотермический режим. Это означает, что температура остается постоянной во время реакции и контролируется в заданных пределах (от 50 до 72°C), в зависимости от требуемой степени полимеризации. Этот подход особенно важен, если изменяется концентрация инициатора полимеризации, поскольку может оказать влияние на тепловые характеристики реакции.

Чтобы обеспечить необходимые условия, при которых должен осуществляться отвод тепла, изменяющегося во времени, используются теплообменные устройства, такие как рубашка и обратный конденсатор. Реакция полимеризации выделяет тепло, которое должно быть эффективно отведено, чтобы поддерживать стабильную температуру. Рубашка окружает реактор и охлаждается заходящей водой, которая принимает на себя часть тепла. Для охлаждения и конденсации испаряющегося винилхлорида в реакторе используется специальный обратный конденсатор, который эффективно удаляет излишнее тепло во время максимального тепловыделения.

Наличие таких теплообменных устройств позволяет эффективно регулировать температуру в реакторе и обеспечивать необходимые условия для процесса полимеризации при изменении концентрации инициатора или других параметров процесса.

Одной из основных характеристик качества получаемого ПВХ является молекулярно-массовое распределение частиц поливинилхлорида, которое в свою очередь зависит от температуры. По мере повышения температуры средняя молекулярная масса частиц уменьшается, что приводит к более широкому распределению молекулярной массы. Это можно объяснить тем, что более высокие температуры вызывают больший разрыв цепи молекул полимера, что приводит к большему количеству более мелких частиц. Кроме того, более высокие температуры могут вызвать разрыв цепи, что также может привести к более широкому распределению молекулярной массы. Таким образом, более высокие температуры имеют тенденцию к уменьшению средней молекулярной массы частиц поливинилхлорида и приводят к более широкому распределению молекулярной массы.

Нейронные сети можно использовать для изучения процесса полимеризации винилхлорида суспензионным методом. Нейронные сети — это мощные вычислительные инструменты, которые можно использовать для анализа сложных нелинейных взаимосвязей между различными входными и выходными данными. Используя нейронную сеть, мож-

но определить конкретные параметры, влияющие на процесс полимеризации, такие как температура, концентрация кислоты, концентрация мономера и скорость перемешивания. Нейронную сеть также можно использовать для разработки модели, которая точно предсказывает свойства полученного полимера, такие как распределение молекулярной массы. Такая модель может быть использована для оптимизации процесса полимеризации и получения желаемых свойств конечного продукта.

Существуют различные программы для создания нейронных сетей, некоторые популярные включают TensorFlow, Keras, PyTorch, Caffe и Theano, Matlab.

Matlab — мощный инструмент в обучении студентов технических вузов. Этот язык программирования, разработанный MATLAB, предоставляет высокоуровневую среду программирования для выполнения технических вычислений, визуализации и анализа данных. Благодаря его широкому применению в инженерии, физике и математике MATLAB становится популярным выбором среди студентов, изучающих эти области (рис. 2).

Существуют следующие типы нейронных сетей:

1. Конкурирующая сеть: тип неконтролируемой сети, в которой нейроны конкурируют друг с другом за активацию на основе входных сигналов. Используется для кластеризации и распознавания образов.

2. Каскадная сеть с прямым и обратным распространением сигналов является контролируемой нейронной сетью, которая используется для обучения

моделей. Она состоит из нескольких скрытых слоев и применяется в задачах распознавания изображений и речи.

Прямое распространение сигнала происходит от входного слоя к выходному, где каждый нейрон в слое передает свой выход следующему слою. Обратное распространение ошибки используется для коррекции весов и оптимизации модели. Ошибки сравниваются с ожидаемыми результатами, и сигнал обратной связи распространяется обратно через сеть для обновления весов нейронов.

Такая архитектура нейронной сети позволяет обучать модель на основе большого количества размеченных данных и значительно повышает ее способность распознавания и классификации.

3. Сеть Элмана с обратным распространением: тип рекуррентной нейронной сети, которая может хранить и обрабатывать последовательные данные. Она используется для распознавания речи и прогнозирования временных рядов.

4. Сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки: контролируемая сеть с прямой связью, которая использует обратное распространение ошибки для обучения модели. Она используется для задач классификации и регрессии.

5. Сеть с задержкой и обратным распространением: тип рекуррентной нейронной сети, которая может обрабатывать входные сигналы с временными задержками. Она используется для распознавания речи и распознавания образов.

6. Обобщенная регрессионная сеть. Тип нейронной сети, используемый для регрессионного анализа. Она использует один скрытый слой и может обрабатывать несколько входных и выходных переменных.

7. Сеть Хопфилда: тип сети ассоциативной памяти, которая может хранить и вызывать шаблоны. Она используется для распознавания изображений и образов.

8. Линейный слой (создание): тип нейронной сети, используемый для задач линейной регрессии. Она использует один скрытый слой и может обрабатывать несколько входных и выходных переменных.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для математического расчета технологических параметров, не поддающихся прямому измерению, были проведены анализ литературных источников по рассматриваемому процессу и установление соответствующих зависимостей между эмпирическими данными в соответствии с основными закономерностями термодинамики и процессов массообмена [1–6].

В ходе исследования применен метод нейронных сетей для описания процесса полимеризации ви-

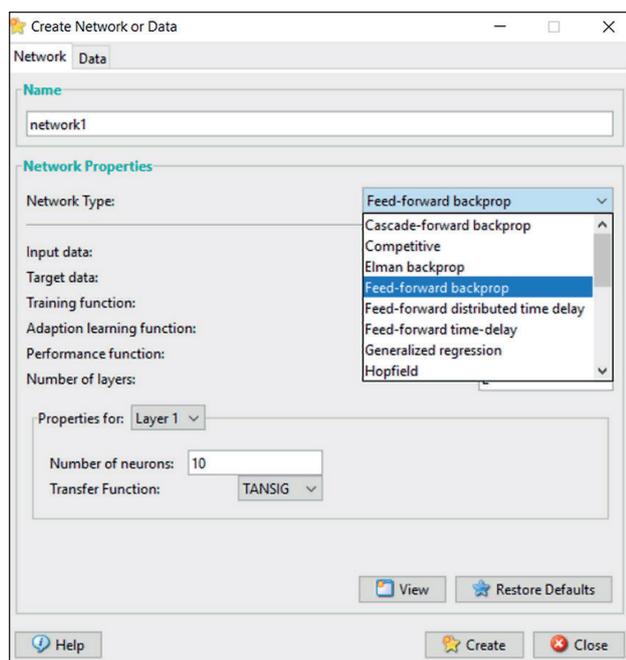


Рис. 2. Определение вида нейросети в Matlab

нилхлорида суспензионным способом. Для решения данной проблемы была использована каскадная сеть, имеющая прямое распространение сигнала и обратное распространение ошибки. В скрытом слое сети — десять сигмоидных нейронов, а в выходном слое — два линейных нейрона.

Это тип алгоритма обучения с учителем, используемый для обучения искусственных нейронных сетей. Алгоритм каскадного обратного распространения используется для повышения производительности стандартного алгоритма обратного распространения с прямой связью за счет использования многоэтапной архитектуры. Многоэтапная архитектура такова, что выходные данные одного этапа нейронной сети используются в качестве входных данных для следующего этапа.

Алгоритм каскадного обратного распространения включает разделение сети на ряд подсетей, при этом каждая подсеть обучается отдельно. Затем выходные данные каждой подсети подаются в качестве входных данных для следующей подсети. Этот процесс завершается получением окончательного результата нейронной сети.

Во время обучения алгоритм сначала выполняет прямой проход по сети, чтобы сгенерировать прогнозируемый результат. Затем вычисляется разница между прогнозируемым выходом и ожидаемым выходом и вычисляются градиенты ошибки по отношению к каждому весу в сети. Затем эти градиенты используются для обновления весов в каждой подсети.

Каскадная сеть, имеющая прямое распространение сигнала и обратное распространение ошибки, состав которой в скрытом слое имеет десять сигмоидных нейронов и два линейных нейрона в выходном слое, может быть описана следующим образом:

Входной слой принимает входные данные, которые представляют собой признаки или характеристики задачи.

Скрытый слой состоит из десяти сигмоидных нейронов. Каждый нейрон принимает входные сигналы и применяет функцию активации сигмоида для генерации выходного значения.

Выходной слой состоит из двух линейных нейронов. Каждый нейрон принимает выходы из скрытого слоя и вычисляет линейную комбинацию с весами и смещением, не применяя функцию активации.

Прямое распространение сигнала:

Входные данные передаются через сеть от входного слоя к скрытому слою и затем к выходному слою.

Каждый нейрон в скрытом слое применяет функцию активации сигмоида к входным сигналам и генерирует выходное значение.

Выходные значения из скрытого слоя передаются в нейроны выходного слоя без применения функции активации.

Обратное распространение ошибки:

- Ошибка вычисляется путем сравнения выходных значений сети с ожидаемыми значениями на основе выбранной функции ошибки.
 - Ошибка распространяется обратно через сеть, начиная с выходного слоя, с использованием алгоритма обратного распространения ошибки.
 - Веса и смещения сети обновляются в соответствии с градиентным спуском и правилом обновления весов для минимизации ошибки.
- Обучение и оптимизация:
- Сеть обучается на обучающем наборе данных, повторяя процесс прямого и обратного распространения ошибки.
 - Гиперпараметры, такие как скорость обучения и количество эпох, могут быть настроены для достижения оптимальных результатов.
 - После обучения сеть может быть проверена на валидационном наборе данных и дальше на тестовом наборе данных для оценки ее производительности.
 - Было показано, что алгоритм каскадного прямого обратного распространения эффективен для повышения точности нейронных сетей, особенно в случаях, когда входные данные зашумлены или когда входные данные сильно различаются. Кроме того, использование отдельных подсетей позволяет повысить вычислительную эффективность алгоритма, поскольку каждую подсеть можно обучать независимо от других.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Процесс получения поливинилхлорида, рассматриваемый здесь, осуществляется при постоянной температуре, что требует контроля отвода тепла, который может меняться со временем в зависимости от того, каким будет состав процесса, включая концентрацию инициатора полимеризации.

В результате проведенных исследований были выявлены связи между изменением теплового потока, который возникает во время реакции полимеризации, и изменением концентрации инициатора со временем (рис.3).

$$Q\left(\frac{Bm}{M^2}\right) = \sum_{i=0}^6 A_i \cdot t^i, \quad (1)$$

где t — время, ч.; A_i — коэффициенты уравнения, определяемые соотношениями $A_0 = -0,5962 + 6,4758Z$; $A_1 = 1,7535 - 11,4222Z$; $A_2 = -0,5806 + 8,7025Z$; $A_3 = 8,64 \cdot 10^{-2} - 3,4579Z$; $A_4 = -4,6 \cdot 10^{-3} + 0,748Z$; $A_5 = -8,23 \cdot 10^{-2}Z$; $A_6 = 3,6 \cdot 10^{-3}Z$.

$Z = C - C_0 / C_1 - C_0$, $C_1 = 0,1\%$ масс от ВХ, $C_0 = 0,065\%$ масс от ВХ.

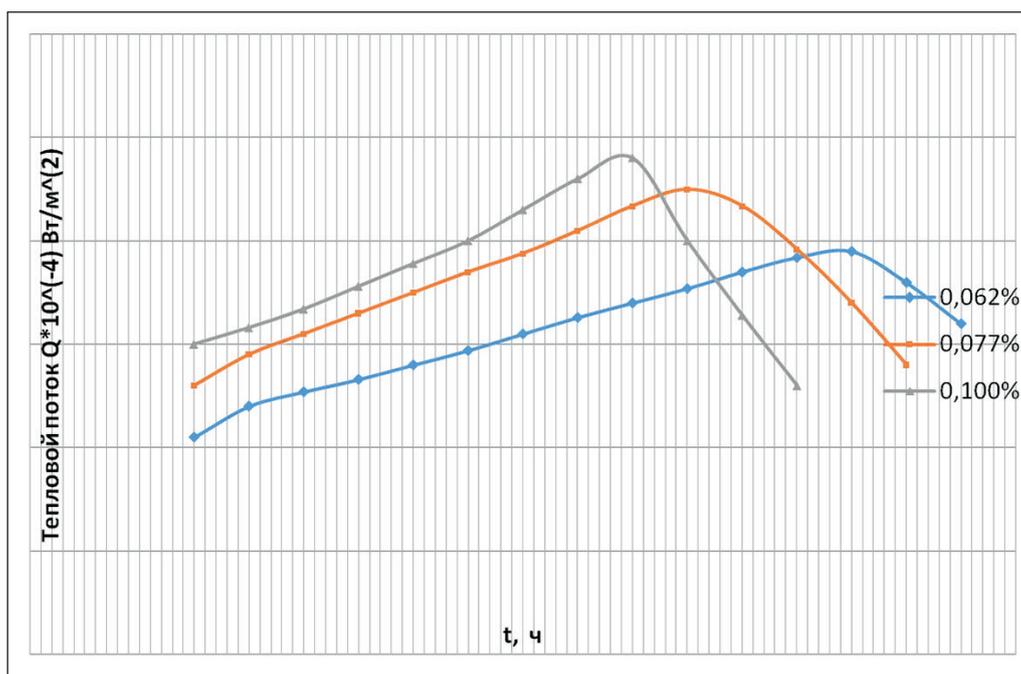


Рис. 3. Зависимость теплового потока от времени полимеризации при концентрациях инициатора (триганокса): 0,065% масс.от ВХ, 0,077% масс. от ВХ и 0,10% масс. от ВХ

Данные зависимости применяются для регулирования расхода хладагента в охлаждающей системе реактора с целью обеспечения постоянной температуры во время проведения процесса.

$$G_V(t) \left[\frac{M^3}{\text{час}} \right] = G_{V0} K \left(\sum_{i=0}^6 A_i t^i \right), \quad (2)$$

где $K = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}$

В процессе полимеризации температура полимер-мономерных частиц винилхлорида, обозначенная как $T(r)$, отличается от температуры реакционной среды, обозначенной как T_c . Из решения стационарного уравнения теплопроводности для сферических полимер-мономерных частиц радиусом R и коэффициентом теплопроводности λ следует, что температура определяется по следующему соотношению:

$$T(r) = T_c + \frac{QR}{2\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), 0 \leq r \leq R. \quad (3)$$

Видно, что температура достигает максимального значения в центре частицы при $r \rightarrow 0$. Отклонение температуры внутри капли от температуры реакционной смеси может достигать 10°C , что влияет на распределение молекулярной массы полимера.

Опираясь на зависимость размеров полимер-мономерных частиц от интенсивности перемешивания и свойств стабилизатора эмульсии [1] и анализа эмпирических данных, была разработана формула, устанавливающая связь химико-технологических

параметров с конструктивными особенностями реактора-полимеризатора (рис. 5).

$$d = 0.064 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \cdot \frac{1+2\Phi}{n^{1,2} d_m^{0,8}}, \quad (4)$$

где $We = \rho n^2 d_m^3 / \zeta$ – число Вебера, Φ – объемная доля дисперсной фазы в эмульсии, ρ – плотность, n , d_m – частота вращения и диаметр мешалки соответственно, ζ – коэффициент поверхностного натяжения.

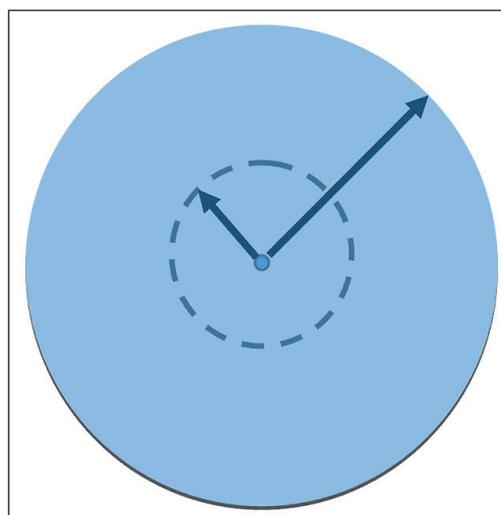


Рис. 4. Сферическая полимер-мономерная частица радиуса R



Рис. 5. Реактор-полимеризатор

Обобщая полученные зависимости, можно сделать вывод, что, изменяя частоту вращения мешалки, можно изменять размер частиц и, следовательно, молекулярно-массовое распределение поливинилхлорида.

Для улучшения качества выпускаемого продукта в процессе полимеризации винилхлорида были разработаны модели на концептуальном, топологическом и структурном уровнях.

Модель на концептуальном уровне строится с разделением выбранных параметров на входные и выходные параметры. Она содержит исходную информацию для дальнейшего расчета, которая представлена в табл. 1.

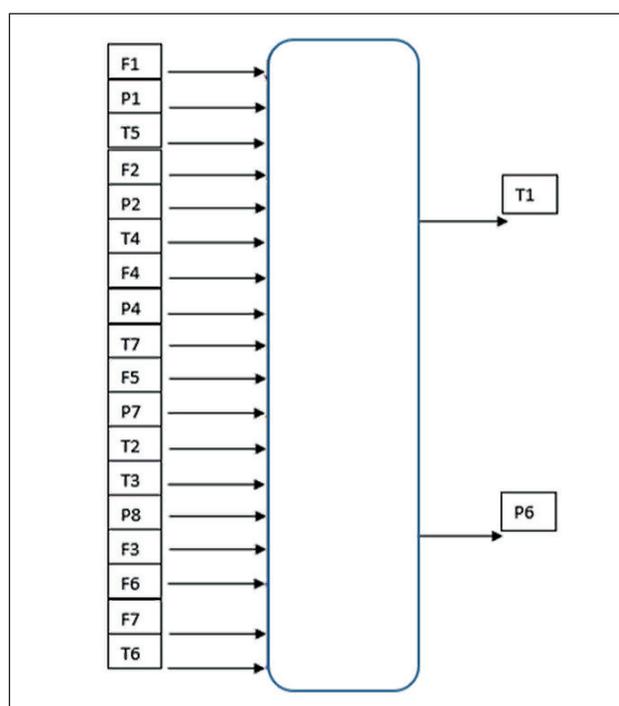
Это поможет оптимизировать процесс полимеризации и получить полимер с однородной молекулярной массой, что, в свою очередь, повысит качество выпускаемого продукта.

Рис. 6. Концептуальная модель для разработки нейросети

Таблица 1

Входные и выходные параметры реактора-полимеризатора

Наименование технологических параметров	Переменная
Расход раствора В72	F1
Давление раствора В72	P1
Температура раствора В72	T5
Расход раствора метоцела	F2
Давление раствора метоцела	P2
Температура раствора метоцела	T4
Расход инициатора – триганокс WD-100	F4
Давление инициатора	P4
Температура инициатора – триганокс WD-100	T7
Расход обессоленной воды	F5
Давление обессоленной воды	P7
Температура обессоленной воды	T2
Температура винилхлорида	T3
Давление винилхлорида	P8
Расход винилхлорида	F3
Расход раствора агидола	F6
Расход соды	F7
Температура бикорбоната натрия	T6
Давление суспензии поливинилхлорида	P6
Температура суспензии ПВХ	T1



Для решения данного задания была выбрана нейронная сеть Cascade-forward backprop, состоящая из десяти сигмоидных нейронов в скрытом слое (рис. 7).

Для проектирования искусственной нейронной сети был использован инструмент nntool в программе Matlab, который позволяет создавать и настраивать нейронные сети в графической среде Neural Network Toolbox. В графическом интерфейсе выбран тип нейронной сети Cascade-forward backprop (рис. 8), количество нейронов во входном, скрытом и выходном слоях. Выбрана функция активации для каждого слоя. Обучена сеть.

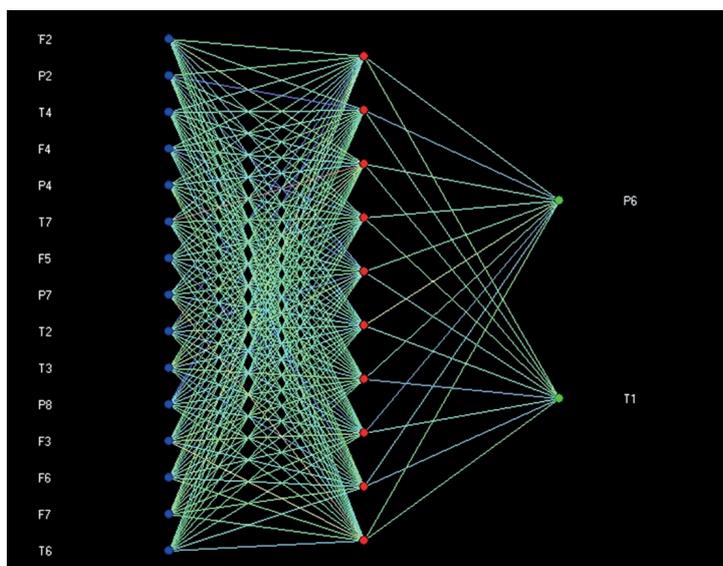


Рис. 7. Концептуальная модель нейронной сети для регулирования технологических параметров с десятью сигмоидными нейронами скрытого слоя

ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки результатов и проверки выходных значений нейронных сетей можно использовать проверочные данные. Вкладка «Simulate» в окне настройки нейросети позволяет подавать входные значения и анализировать соответствующие выходные значения.

Табл. 2, содержащая проверочные данные, использована инструментом для оценки работы нейронной сети. С помощью подачи входных значений из табл. 2 в симуляционное окно осуществляется сравнение полученных выходных значений с ожида-

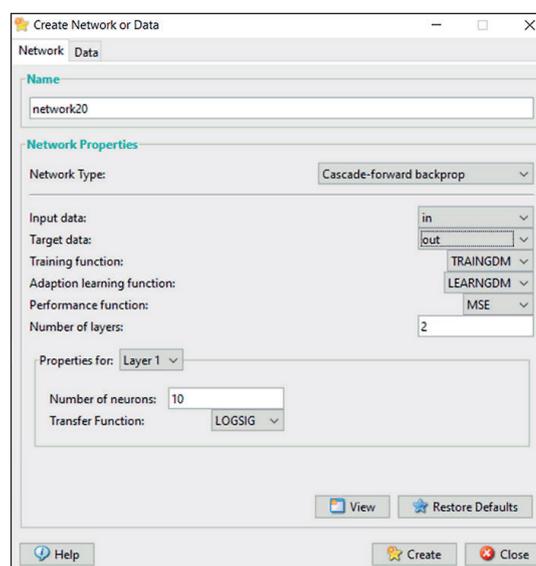


Рис. 8. Создание искусственной нейронной сети

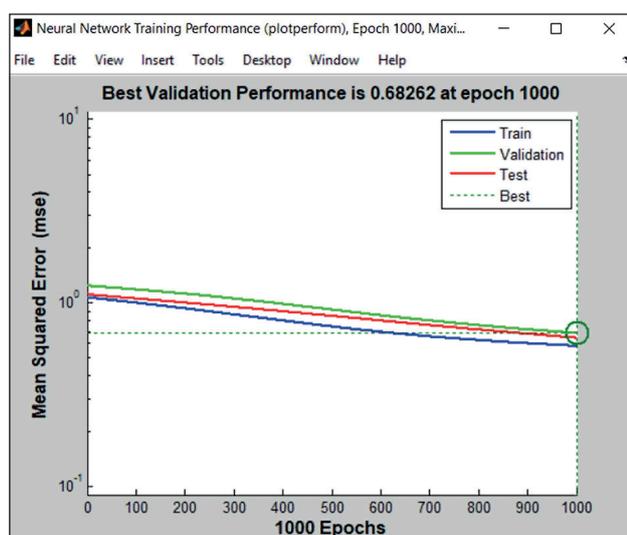


Рис. 9. Средняя квадратичная ошибка

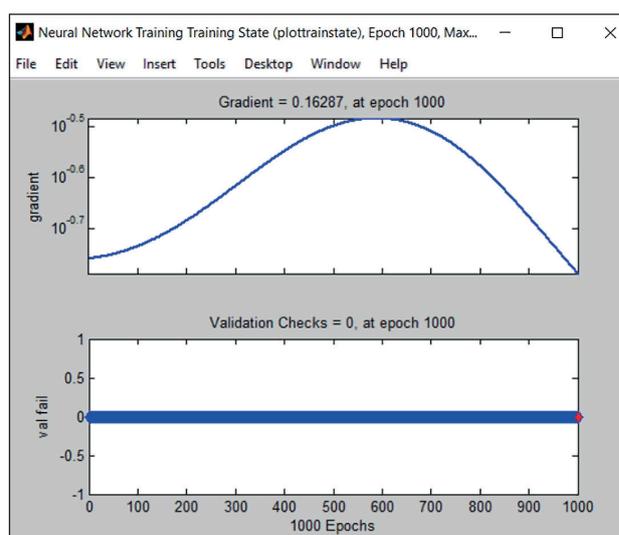


Рис. 10. Графики обучения сети

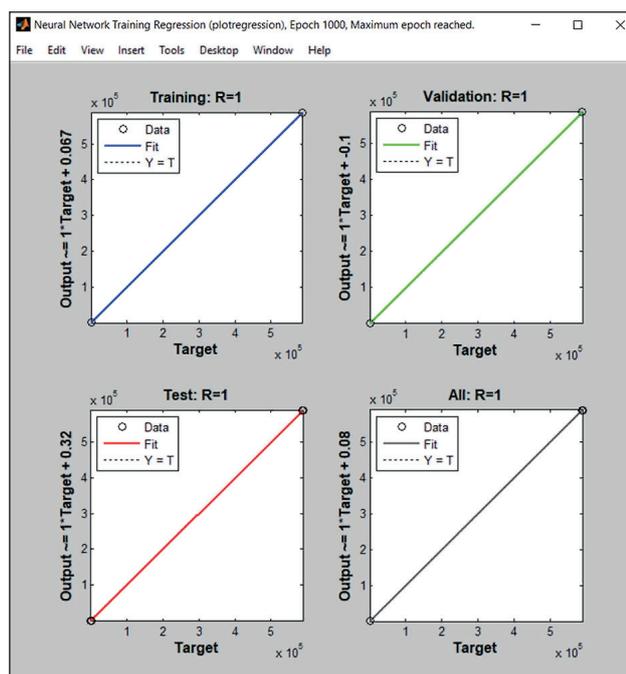


Рис. 11. График линейной регрессии

емыми результатами, что дает возможность оценить точность и надежность нейронной сети в распознавании и классификации данных.

Полученные результаты имеют минимальную погрешность и близки к реальным значениям, что говорит о том, что сеть обучена правильно и зависимость между данными найдена.

Таким образом, разработанную нейросеть можно использовать для прогнозирования молекулярно-массового распределения частиц ПВХ.

Для корректировки марки получаемой продукции можно использовать формулы [2–4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований были получены следующие результаты.

Была установлена зависимость теплового потока от концентрации инициатора и разработана математическая формула, которая позволяет регулировать расход хладагента в охлаждающей системе реактора для поддержания постоянной температуры и обеспечения изотермического процесса. Эта формула является инструментом для оптимального управления тепловым режимом реактора и обеспечения его стабильной работы.

Было обнаружено, что увеличение температуры приводит к расширению спектра молекулярно-массового распределения в сторону меньших молекулярных масс.

Получена формула, определяющая связь химико-технологических параметров с конструктивными

Таблица 2

Проверка нейронной сети

Входные значения		
	1 группа	2 группа
F2, кг/ч	230,11	232,05
P2, Па	872796,85	872797,11
T4, С	24,68	24,72
F4, кг/ч	74,73	75,91
P4, Па	254973,62	254974,09
T7, С	–22,30	–22,34
F5, кг/ч	29005,33	29000,10
P7, Па	200000,61	200000,95
T2, С	95,63	95,18
T3, С	38,15	33,86
P8, Па	591000,05	524078,65
F3, кг/ч	26018,05	26004,93
F6, Па	49032,10	49032,24
F7, кг/ч	5,50	5,47
T6, С	49,00	50,41
Выходные значения		
Проверочные значения		
P6, Па	588399,02	588397,64
T1, С	66,98	65,81
Полученные значения		
P6, Па	588400	588400
T1, С	66,74	65,23

особенностями реактора-полимеризатора. Установлено, что, изменяя частоту вращения мешалки, можно изменять размер частиц и, следовательно, молекулярно-массовое распределение поливинилхлорида.

Разработка нейронной сети для описания и прогнозирования процесса полимеризации винилхлорида по суспензионному методу является обоснованной. Для обеспечения качества ПВХ, включая соответствующее молекулярно-массовое распределение, была создана нейронная сеть с использованием каскадной архитектуры прямого и обратного распространения сигнала, десятью сигмоидными нейронами в скрытом слое и двумя линейными нейронами в выходном слое. Разработка проводилась в среде MATLAB.

Проведены обучение по выборке и проверка на тестовых значениях, которая показала, что сеть с минимальной допускаемой погрешностью предсказывает исход процесса при прочих неизменных параметрах. Это, в свою очередь, позволит управлять и оптимизировать технологический процесс и получать продукцию заданного качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ульянов В.М., Гуткович А.Д., Шебырев В.В. Технологическое оборудование производства суспензионного поливинилхлорида: Монография. Н. Новгород. 2004. 253 с.
2. Получение и свойства поливинилхлорида / Под ред. Е.Н. Зильбермана. М.: Химия, 1968. 432 с.
3. Mathematical methods of modeling of polymerizer reactor for the process of polymerization of vinyl chloride. Kovalenko, Y.F., Shulaeva, E.A. AIP Conference Proceeding, 2022, 2467, 060023
4. Mathematical methods for modeling of the process of diaphragm electrolysis Shulaeva, E.A., Kovalenko, Y.F., Serebryakov, E.A. AIP Conference Proceedings, 2022, 2467, 060012
5. Modeling of the process of electrolysis production of caustic, chlorine and hydrogen. Shulaeva, E.A., Shulaev, N.S., Kovalenko, J.F. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 803(1), 012148
6. Simulation and modeling software in chemical technology: Polymerization of vinyl chloride. Shulaeva, E.A., Kovalenko, Y.F., Shulaev, N.S. Advanced Materials Research, 2014, 1040, pp. 581–584
7. Ксандров Н.В. Ресурсосбережение в химической технологии: учебное пособие для вузов / Н. В. Ксандров, О. Р. Ожогина, А. А. Перетрутов. Н.Новгород. 2014. 101с.
8. Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С. Моделирование молекулярно-массового распределения при получении поливинилхлорида суспензионным способом // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2016. № 1. С. 128–131.
9. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Компьютерное моделирование технологических процессов // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 54. № 4. С. 40–55.
10. Муравьева Е.А., Казанцев Р.В., Подлесский Д.В. Разработка нейронной сети для управления процессом щелочной отмывки изопентан-изопрен-толуольной фракции с использованием виртуального анализатора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2022. № 2. С. 120–137.
11. Расчеты аппаратов кипящего слоя / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. Издательство: «Химия», Ленинградское отделение, 1986. 352 с.
12. Шулаева Е.А., Коваленко Ю.Ф., Серебряков Е.А. Моделирование процесса диафрагменного электролиза // Естественные и технические науки. 2021. № 8 (159). С. 190–192.
13. Шулаева Е.А., Даминев Р.Р., Исламутдинова А.А. Особенности создания имитационно-моделирующих комплексов распространенных нефтехимических процессов на примере процесса синтеза винилацетата // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 4. 127–134.
14. Шулаева Е.А., Коваленко Ю.Ф. Математическое моделирование и анализ параметров технологического процесса диафрагменного электролиза // Естественные и технические науки. 2022. № 7 (170). С. 214–215.
15. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Моделирование параметров электролизера в производстве едкого натра, хлора и водорода // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 4. С. 103–107.
16. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride. Advanced Materials Research Vol. 1040 (2014), pp. 581–584.
17. Штовба С.Д. Обеспечение точности и прозрачности нечеткой модели Мамдани при обучении по экспериментальным данным // Проблемы управления и информатики. 2007. № 4. С. 102–114.
18. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учеб. пособие. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2008. 316 с.
19. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: ГЛТ, 2010. 496 с.
20. Галушкин А.И., Цыпкин Я.З. Нейронные сети: история развития теории: учеб. пособие для вузов. М.: Альянс, 2015. 840 с.
21. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: РиС, 2013. 384 с.
22. Ширяев В.И. Финансовые рынки: Нейронные сети, хаос и нелинейная динамика. М.: КД Либроком, 2016. 232 с.
23. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Ленанд, 2017. 224 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коваленко Юлия Фанильевна – ассистент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Республика Башкортостан, Россия, julia_str_ak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0661-2804>

Шулаева Екатерина Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Республика Башкортостан, Россия, eshulaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8108-7387>

Шулаев Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика, математика и физика», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Республика Башкортостан, Россия, nshulayev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3595-6948>

ВКЛАД АВТОРОВ

Коваленко Ю.Ф. – обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения; графическое и табличное представление результатов исследования; написание исходного текста статьи.

Шулаева Е.А. – литературный обзор; проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных; составление итоговых выводов.

Шулаев Н.С. – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 03.11.2023.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-531-537>

CC BY 4.0

Iron oxide pigment as a coloring nanofill for decorative concrete products

Elmira K. Aminova* , Lilia Z. Kasyanova , Aigul A. Islamutdinova , Lilia R. Asfandiyarova 

Branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia

* Corresponding author: e-mail: k.elmira.k@yandex.ru

ABSTRACT: Introduction. Current research on the performance properties of decorative concrete, when added to the concrete mixture of nano pigments are more recommendatory. In the academic literature, it is recommended to introduce pigment in the amount of about 5% of the total cement mass when creating improvement elements. The recommendations described above often demonstrate the potential for using nano pigments in terms of the influence of the amount of nano-additive applied on the uniformity of the coating texture. Characteristics such as intensity and retention time of the resulting color are also taken into account. In RF we do not have approved regulations on how to use pigments for concrete coloring. Pigments are obtained mainly from iron oxides due to their availability and low toxicity to the human body, and are promising nanomaterials in construction. **Methods and materials.** The study is aimed at the use of iron oxide pigment obtained from a spent iron oxide dehydrogenation catalyst as a coloring nanofiller and improving the strength characteristics of decorative concrete products. Spent iron oxide catalysts containing iron oxide particles are considered as a by-product of chemical production. The purpose of this study is to use a pigment (in the form of Fe_2O_3 and Fe_3O_4) obtained from the composition of a spent iron oxide catalyst as an additional binder and coloring nanomaterial in the composition of decorative concrete products. The effect was evaluated by testing mechanical properties such as strength, color, water absorption, water and frost resistance. **Results.** The research results have shown that the use of nanopigment in the technology of concrete production improves the properties of cementing composites (cement) and allows you to change the color of products. **Conclusion.** This study consists in the application of an iron oxide nanopigment obtained from a spent catalyst for the dehydrogenation of olefins and alkyaromatic hydrocarbons in decorative concrete products with the provision of mechanical characteristics and chromaticity of products.

KEYWORDS: decorative concrete products, spent catalyst, nanopigment.

FOR CITATION: Aminova E.K., Kasyanova L.Z., Islamutdinova A.A., Asfandiyarova L.R. Iron oxide pigment as a coloring nanofiller of decorative concrete products. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15(6): 531–537. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-531-537>. – EDN: UGFCQW.

INTRODUCTION

The improvement of construction technologies today occupies one of the main directions in the research process. Great importance is given to the construction of residential buildings and public facilities. Finishing the facades of such structures plays an important role, and strict requirements are imposed on it. The color scheme of modern construction structures and art objects has very wide possibilities. For this purpose, colored dry mixes are used for construction and finishing works, such as building walls, panels, building blocks and other building structures. Decorative concrete charge is obtained in practice using painted cements or by introducing dyes into the composition of building mixes [1–2]. The Portland

cement medium is alkaline, so the additive introduced into it must be resistant to an alkaline environment. Also, one of the important characteristics in the preparation of the charge is to take into account the coating capacity, which is characterized not by a decrease in the strength characteristics of decorative concrete products, but by their improvement, also taking into account the consumption rate of the binder. In the manufacture of most decorative concrete materials, yellow, red, black and brown colors are used, the basis of which is an iron oxide pigment. These pigments can be both natural and synthetic. Natural pigments are rarely used in the production of concrete coatings, due to their low performance characteristics, such as moisture capacity, low brightness of such materials and quality variability. The future of

© Aminova E.K., Kasyanova L.Z., Islamutdinova A.A., Asfandiyarova L.R., 2023

decorative concrete products in their production lies in the use of specific nanopigments with variable capabilities according to customer requirements. It should be noted that synthetic pigments have a high coloring and covering ability.

The improvement of the technology of using pigments in building materials has led to the development and application of pigments that are particles less than 100 nanometers in size. The use of nanopigments in concrete has a number of advantages, such as a deeper and richer color, improved UV resistance and durability of the material [3–9].

Experiments with pigments in concrete began in the late twentieth century. However, they were initially limited to laboratory applications and had no industrial applications.

With the advent of new technologies and the development of technologies in recent decades, the use of nanopigments in concrete has become increasingly popular. With the help of nanopigments, it became possible to achieve a wide range of color shades and create unique design solutions for decorative elements made of concrete.

Due to their small size, nanopigments are mixed with the concrete mixture at the molecular level, ensuring uniform color distribution in the material. This allows you to create a deeper and richer color that surpasses traditional pigments in the quality of concrete coloring. One of the main advantages of using nanopigments in concrete is their high resistance to ultraviolet radiation and external influences. Due to this, the concrete surfaces painted with pigments retain their brightness and color stability for a long time.

In the recent past, construction companies used synthetic stone material obtained on the basis of water, sand and crushed stone in the production of concrete mixtures. By mixing these components, solid and durable compositions are obtained. Such compositions characterize themselves well when obtaining foundations, walls, ceilings, cladding materials for internal and external surfaces. Currently, high requirements for the service life of building materials are imposed, as a rule, not less than ten years. They are mainly used in the design of homesteads, parks, shopping centers, squares that are under the influence of an aggressive environment.

Today, the use of nanopigments in concrete has found wide application in the construction industry. They are used to create decorative elements such as sidewalk slabs, wall panels, building facades and other architectural structures. Yellow oxide nanopigments open up new opportunities for designers and architects, allowing them to create unique and visually attractive elements from concrete.

In general, the use of pigments based on a mixture of Fe (II) and Fe(III) in concrete is a modern technology that allows achieving high aesthetic appeal and durability

of painted concrete surfaces. This technology continues to evolve, and it is expected that in the future its application in construction and design will become more widespread and innovative.

Industrial production of nanomaterials during finishing works is currently growing rapidly. Decorative cement concrete products are in great demand, the main disadvantage of which is low resistance in aggressive environments, in conditions with variable temperature changes, such as freezing and thawing, as well as resistance to impact and abrasion. Therefore, obtaining mixtures for the manufacture of decorative concrete products with improved characteristics is an urgent and promising task.

To date, there are no regulatory documents and quality standards for the use of pigments in painting decorative concrete and other building materials in our country. European companies use in the production of these materials the international standard EN 12 878 “Pigments for coloring building materials on cement and lime binder” [10–11], the United States uses the standard ASTM C 979 “Pigments for Integrally Colored Concrete” [12]. When applying these standards, the effect of the pigment on the curing time of the cement mixture and on the strength of the final product is taken into account.

An analysis of studies that relate to the application of nanopigment additives in concrete and decorative mixtures shows that this topic is poorly studied and is interesting and useful from the point of view of industrial waste disposal.

Due to the demand of the population, every year more and more attention is paid to the construction of both civil and public facilities, squares and parks, where decorative concrete materials of various colors are an integral part of the decoration [13–20].

METHODS AND MATERIALS

The paper proposes a method for environmentally friendly processing of catalyst waste hydrogenation of unsaturated hydrocarbons to obtain a valuable product – nanopigment. Pigment – iron oxide nano-additive – improves the strength properties of concrete and allows you to get bright solid concrete masses. Reducing efflorescence is also a positive aspect of its use.

One of the pigments widely used in decorative concrete is iron oxide pigment. It is necessary to note some features of iron oxide pigments and their use in decorative concrete. It is iron oxide pigments that offer a wide range of colors, including shades of red, yellow, brown and black. This allows designers and architects to choose the right color to create aesthetically attractive and individual surfaces made of decorative concrete. In addition, they are highly resistant to UV rays, fading, moisture, chemicals and mechanical wear. This makes them an ideal choice for use in open spaces, including building facades, sidewalks, playgrounds

and other landscape elements. Environmental safety is quite important. Iron oxide pigments as nanofillers are environmentally safe and do not contain heavy metals or harmful chemical compounds. They do not have a negative impact on the environment and human health, which makes them the preferred choice for use in construction and repair. In this work, an iron oxide pigment obtained from a spent iron-containing catalyst is used, which increases the attractiveness of the work in connection with solving the problems of solid waste disposal and obtaining environmentally friendly products for construction.

Spent iron oxide catalysts, depending on their modification, contain up to 80% iron oxides in the form of hematite and magnetite. The water-soluble components of the catalyst form an alkaline medium. Freed from water-soluble components, followed by drying and grinding in a disintegrator up to 3–20 microns, the product is a mixture of iron oxides in the form of Fe_2O_3 and Fe_3O_4 .

The Portland cement medium is alkaline, so the additive introduced into it must be resistant to an alkaline environment. And when preparing the charge, it is necessary to take into account the coating capacity, which does not reduce the strength characteristics of decorative concrete products, as well as taking into account the consumption rate of the binder [8].

RESULTS

The most popular colors for the consumer are yellow, red, brown and black. The nanopigment obtained by us from the spent iron oxide catalyst is a red-brown product, the characteristics of which are presented in Table 1.

Bayer pigments are used in Europe. These pigments demonstrate high quality, but are very expensive. Thus, when used on a large scale in the production of building materials, in particular decorative concrete products, it leads to high costs for the consumer.

The attractiveness of the proposed nanopigment is its low cost due to the use of a spent iron oxide catalyst as a raw material.

The assessment of the quality of the obtained pigment as a nanofiller for decorative concrete products was car-

Table 1

Physico-chemical parameters of the pigment obtained from spent iron oxide catalysts

Indicator	Pigment
1. Fe_2O_3 content, % by weight.	83.79
2. Water-soluble compounds, % by weight	0.7996
3. pH of the water extract	6.0
4. The residue after dry sieving on a sieve with a grid 016, %	1.3

ried out by preparing concrete products with subsequent testing of the obtained samples according to the following indicators: testing of mechanical properties, such as strength, color, water absorption, resistance to changes in climatic conditions, such as heat and frost resistance.

To do this, a series of experiments were carried out, including the preparation of concrete products with different concentrations of pigments.

For the preparation of the material, components were used, such as: M500 cement, OPTILUX superplasticizer C3 (OPTILUX) for concrete and mortar (meets the requirements of GOST 24211), nanopigment (from a spent iron oxide catalyst), water [21].

The preparation of the concrete mixture was carried out in a laboratory mixing plant. The mixing time was 2–3 minutes. The finished concrete mixture was placed in a mold to create samples. All samples were hardened under natural conditions.

Obtaining a spectrum of colors depends on the amount of pigment added. We studied the effect of the amount of pigment in the range of 3.3–40% by weight. with the production of products of a color range from light brown to dark brown. The formulation of the obtained samples is presented in Table 2.

With the addition of pigment above 40%, it was impossible to obtain samples of concrete products with a uniform smooth surface. For further studies, samples with a pigment content of 3.3, 16.67, 26.67 and 40% were selected.

To test the frost resistance, product samples were placed in a freezer for 2.5 hours at a temperature of minus $18 \pm 2^\circ C$. Then the samples were placed 20 mm apart and subjected to thawing. After saturation with water, the samples were drained with a cloth and placed at a distance of 20 mm from each other and the walls in a freezer. Then they turned on the camera and began to slowly lower the temperature. The initial freezing temperature of the samples is $16^\circ C$.

The studied samples were placed in a bath after freezing and subjected to thawing at a temperature of plus 20–22 degrees.

Calculations:

Calculation of the change in the mass of samples Δm , according to the formula

$$\Delta m = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100,$$

where m is the mass of the sample before freezing and thawing, g; m_1 is the mass of the sample after freezing and thawing, g.

The average maximum permissible decrease in the mass of the samples should not exceed 2%.

According to the results presented in the table, samples with a pigment concentration of 13.3 and 26.6% meet the requirements.

The products were tested for water resistance by immersing the samples in a container with water for 24 hours. After passing this time, the following observations were made:

- samples do not stain the surfaces with which they interact;
- there were no visual changes;
- the water in which the samples were located has no changes in color;
- the strength characteristics of the samples with a pigment concentration of 3.3, 13.3 and 26.6% met the requirements of GOST 10180-90 [22].

The obtained samples were subjected to a heat resistance test.

The samples were placed in a drying cabinet with a set temperature of 50°C for 3 hours. After cooling the samples in natural conditions, the following conclusions were made: no visual changes were detected; no damage was detected by mechanical action (hands); no traces are left when they come into contact with surfaces.

The strength of the studied samples was determined according to GOST 10180-90.

The study of concrete samples for strength consists in measuring the minimum efforts that destroy pre-prepared decorative concrete samples prepared in accordance with regulatory documents. All samples were subjected to the study of strength characteristics after they were maintained at low and elevated temperatures. The samples of decorative concrete, being at rest, were subjected to static loading, the load increase occurred gradually, after which the stress was calculated under these conditions and assumptions of the elastic work of the obtained materials were put forward. The results of laboratory studies of the obtained samples for strength after tests for heat resistance and frost resistance are presented in Table 4.

The research results indicate that the addition of iron oxide nanopigment to the concrete mixture increases the strength of the products and does not change the properties of the samples obtained during tests for heat resistance and frost resistance. However, when a nanopigment is introduced in an amount of 40%, the samples crumble.

The pigment based on the applied nano-additive, in addition to coloring properties, fills the decorative con-

Table 2
Sample formulation

Pigment, g	Cement, g	Sand, g	Water, ml	Percentage of pigment, %
2	20.05	37.96	15	3.3
4	19.35	36.65	15	6.67
6	18.66	35.34	15	10
8	17.97	34.03	15	13.3
10	17.28	32.72	15	16.67
12	16.59	31.41	15	20
14	15.9	30.10	15	23.3
16	15.21	28.79	15	26.67
18	14.52	27.48	15	30
20	13.82	26.18	15	33.3
22	13.13	24.87	15	36.67
24	12.44	23.56	15	40

Table 3
Results of studies of samples for frost resistance

Percentage of pigment in the sample	Mass of the sample before tests (g)	Mass of the sample after the test, (g)	Change in the mass of samples, (g/%)
3.3%	62.2	60.4	2.2/3.5%
13.3%	61.5	60.5	1.0/1.6%
26.6%	60.4	59.7	0.7/1.1%
40%	60.1	58.4	1.7/2.8%

Table 4

Results of strength testing of samples

The amount of nanopigment in the sample, g	Percentage of pigment in the sample, %	Compression (sample before heat resistance and frost resistance tests) MPa	Compression (sample after heat resistance test), MPa	Compression (sample after frost resistance test), MPa
0	0	52.6	52.6	52.7
2	3.30	52.2	52.2	52.0
10	16.6	53.9	53.9	53.6
16	26.6	54.0	54.0	54.4
24	40.0	52.2	52.2	52.2

crete material at the initial stages of mixing, forms crystallization centers, the so-called embryos, then the growth of crystals, their hardening.

Research in this field notes that the resulting nanoparticles, consisting of hydrated iron oxide, are in the α -form.

The α -form of hydrated iron oxide is the germ that initiates the processes of crystal formation and participates in the formation of the structurality of the material. These are the two factors that most affect the color gamut of the resulting nanopigment. For example, in order to get brighter shades and achieve color purity, it is necessary to obtain finely dispersed nanopigments. When the particles are enlarged, the color of the pigment becomes dull. Therefore, it is necessary to understand the need for preliminary grinding before use, since the processes of pigment caking are not excluded. Laboratory tests have shown that when forming a charge using gray cement, the introduced pigment improves the performance characteristics of concrete. It should be borne in mind that the clearest shades of decorative concrete materials can be obtained only when using white cement. The difference in the use of gray or white cement is minimal when obtaining brown or red concrete. When obtaining black concrete, it is preferable to use gray cement.

According to statistics, the brick-red shade of decorative concrete materials is in the greatest demand among

consumers. The nanopigment obtained by us on the basis of iron oxide is the most promising from the point of view of its production on an industrial scale. It is possible to obtain samples with a sufficiently intense color even with its insignificant content (3–4%). This fact undoubtedly has economic attractiveness from the point of view of its practical application (Fig. 1).

According to the conducted studies, according to the intensity of coloring, all samples can be offered to potential consumers, depending on their preferences.

DISCUSSION

Obtaining iron oxide nanopigment from the waste of olefin dehydrogenation processes makes it possible not only to reduce the environmental burden, but also to obtain a valuable product – a coloring pigment widely used in the production of building materials. When iron oxide pigment was introduced into the composition of the concrete charge for the production of decorative concrete products, the following results were obtained:

- the introduction of a brick-red iron oxide nanopigment into the concrete mixture in an amount from 3.3 to 23.0% is accompanied by an increase in strength to 53–54 MPa, while the strength characteristics of



Fig. 1. Concrete samples obtained on the basis of white cement containing iron oxide nanopigment

- concrete products without the introduction of pigment turned out to be less durable;
- the introduction of iron oxide nanopigment into the concrete mixture allowed to reduce the consumption of raw materials;
 - by varying the percentage of coloring pigment, it is possible to adjust the color intensity in accordance with the requirements of the consumer.

CONCLUSION

This paper shows the possibility of using iron oxide nanopigment as a coloring additive that improves the strength characteristics of decorative concrete products.

It was found that with the addition of iron oxide nanopigment from 16...26%, it is possible to obtain samples with the best strength characteristics of decorative concrete products. In addition, reducing the cost of purchasing B25 cement when added to concrete mixes will increase hardening and strength by introducing iron oxide nanopigment up to 26%.

It is relevant to organize the production on an industrial scale of iron oxide nanopigments based on waste from petrochemical processes for their use not only as coloring and strength additives in the production of decorative concrete products, but also in the production of other building materials on an industrial scale using regional resources.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «PRIORITY 2030» (National Project «Science and University»)

REFERENCES

1. ASTM C979 Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete.
2. Piskarev V.A. *Decorative and finishing building materials*. Moscow: Higher School; 1977.
3. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Development of technology for obtaining anticorrosive nanostructured polyalkenylamide-succinimide coatings in construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(1):6–13.
4. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Method of obtaining calcium silicate for construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(6):350–357.
5. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Obtaining the retainer for waterproofing road bitumens. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(5):319–327.
6. Brunauer S., Grenberg S. A. *Chemistry of Cement*; 1960.
7. Shinkareeva E.V., Koshevar V.D., Zhigalova O.L., Zonov Yu.G. The use of industrial waste in the production of ceramic pigments. *Glass and ceramics*. 2006; 12:26-28.
8. Gerasimov L.G., Lazarev I.V., Alekseev A.I., Galturova L.A. Pigments and fillers from technogenic waste. *Construction materials*. 2002; 4: 32-34.
9. Sedelnikova M.B., Pogrebenkov V.M., Gorbatenko V.V., Koutsman E.Ya. Ceramic pigments for building ceramics. *Glass and ceramics*. 2009; 9: 3-7.
10. Belov N.V. *Essays of structural mineralogy*. M.: Nedra; 1976.
11. Shayakhmetov R.Z., Yakovlev V.V. Construction pigments from slime of vrdoochistki. *Building materials*. 2008;12: 32-33.
12. EN 12878:2005 Pigmente zum Einfarben von zement und / oder kalkgebundenen Baustoffen. Anforderungen und Prüfverfahren.
13. Ilin V.M., Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Development of heavy metal-based nanostructured complex technology for use in building mortar. *Nanotechnologies in Construction*. 2022. 14(5):398–404.
14. Bazhenov Yu.M. *Technology of concrete*. M.: DIA; 2007.
15. Belan V.I. Colored cements and their production in the Novosibirsk region *Ecology and resource conservation in materials science*. Novosibirsk. 2000; 8-10.
16. Bozhenov P.I., Kholopova L.I. *Colored cements and their application in construction*. L; 1968.
17. Vilkov S.M. *Investigation of the process of salinity formation during hydration of decorative Portland cement and development of methods for its reduction* : abstract. dis. candidate of Technical Sciences. Sverdlovsk; 1979.
18. Voronin V.V. *Frost resistance and technology of concrete with a modified surface layer*. Autoref. dis. Dr. tech. M., MISI named after V.V. Kuibyshev; 1985.
19. GOST 16872-78 Inorganic pigments. Methods for determining the relative coloring ability.

20. *Decorative concretes using local materials and industrial waste for small architectural forms* / N.I. Slesareva, G.D. Kovalenko, V.A. Krasnyuk. Overview information of the Ministry of Housing and Communal Services. M.; 1986 (3).

21. GOST 24211 –2008 Additives for concrete and mortar.

22. GOST 10180-90 Methods for determining strength from control samples.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elmira K. Aminova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor, Department of General Chemical Technology, branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, k.elmira.k@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3105-3477>

Liliya Z. Kasyanova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor, Department of General Chemical Technology, branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, kasyanova-liliya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1831-2793>

Aigul A. Islamutdinova – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor, Department of General Chemical Technology, branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, aygul_ru@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2097>

Lilia R. Asfandiyarova – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor, Department of General Chemical Technology, branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia, asfand_lilya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-201X>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Elmira K. Aminova – literary review; conducting the experimental part.

Liliya Z. Kasyanova – scientific guidance; final conclusions.

Aigul A. Islamutdinova – the concept of research; writing the source text.

Lilia R. Asfandiyarova – processing and analysis of experimental data.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 30.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 02.11.2023.

Научная статья

УДК 674.8

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-531-537>

CC BY 4.0

Железооксидный пигмент как красящий наноуполнитель декоративно-бетонных изделий

Эльмира Курбангалиевна Аминова* , Лилия Зайнулловна Касьянова ,
Айгуль Акрамовна Исламутдинова , Лилия Рафиковна Асфандиярова 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: k.elmira.k@yandex.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Современные исследования, посвященные изучению эксплуатационных свойств декоративных бетонов, при добавлении к бетонной смеси нанопигментов несут больше рекомендательный характер. В научной литературе чаще всего при создании элементов благоустройства рекомендуется введение пигмента в количестве около 5% от общей массы цемента. Все описанные рекомендации чаще всего показывают возможность использования нанопигментов с точки зрения влияния количества применяемой нанодобавки на однородность текстуры покрытия. Также учитываются такие характеристики, как интенсивность и время сохранения полученного цвета. В нашей стране нет утвержденных нормативных документов, регламентирующих способы использования пигментов для окрашивания бетонов. Пигменты получают в основном из оксидов железа вследствие их доступности и низкой токсичности для организма человека, являются перспективными наноматериалами в строительстве. **Методы и материалы.** Исследование направлено на применение железооксидного пигмента, полученного из отработанного железооксидного катализатора дегидрирования, в качестве красящего наноуполнителя и улучшающего прочностные характеристики декоративно-бетонных изделий. Отработанные железооксидные катализаторы, содержащие частицы оксидов железа, рассматриваются как побочный продукт химического производства. Целью данного исследования является применение пигмента (в виде Fe_2O_3 и Fe_3O_4), полученного из состава отработанного железооксидного катализатора в качестве дополнительного вяжущего и красящего наноматериала в составе декоративно-бетонных изделий. Эффект оценивали путем тестирования механических свойств, таких как прочность, цветность, водопоглощение, водо- и морозостойчивость. **Результаты.** Результаты исследований показали, что использование нанопигмента в технологии получения бетона улучшает свойства цементирующих композитов (цемента) и позволяет изменить цветность изделий. **Заключение.** Данное исследование заключается в применении железооксидного нанопигмента, полученного из отработанного катализатора дегидрирования олефинов и алкилароматических углеводородов, в декоративно-бетонных изделиях с обеспечением механических характеристик и цветности продуктов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: декоративно-бетонные изделия, отработанный катализатор, нанопигмент.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аминова Э.К., Касьянова Л.З., Исламутдинова А.А., Асфандиярова Л.Р. Железооксидный пигмент как красящий наноуполнитель декоративно-бетонных изделий // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15, № 6. С. 531–537. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-531-537>. – EDN: UGFCQW.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование строительных технологий на сегодняшний день занимает одно из основных направлений в научно-исследовательском процессе. Огромное значение уделяется строительству жилых зданий и общественных сооружений. Отделка фасадов таких сооружений играет большую роль, и к ней предъявляются строгие требования. Цветовая гамма современных строительных сооружений и объектов имеет очень широкие возможности. С этой

целью используются колорированные сухие смеси для строительства и отделочных работ, таких как стены зданий, панели, строительные блоки и другие строительные конструкции. Декоративно-бетонную шихту на практике получают с использованием окрашенных цементов или путем введения красителей в состав строительных смесей [1–2]. Среда портландцемента является щелочной, поэтому вводимая в нее добавка должна быть устойчивой к щелочной среде. Также одной из важных характеристик при подготовке шихты необходимо учитывать покрывную

© Аминова Э.К., Касьянова Л.З., Исламутдинова А.А., Асфандиярова Л.Р., 2023

способность, которая характеризуется не снижением прочностных характеристик декоративно-бетонных изделий, а их улучшением также с учетом нормы расхода вяжущего. При изготовлении большинства декоративно-бетонных материалов используют желтый, красный, черный и коричневый цвета, основой которых является железооксидный пигмент. Эти пигменты могут быть как натуральными, так и синтетическими. Натуральные пигменты достаточно редко применяют в производстве бетонных покрытий в связи с их низкой эксплуатационной характеристикой, такой как влагоемкость, низкая яркость таких конструкция и непостоянность качества. Будущее декоративно-бетонных изделий при их получении — за использованием специфичных нанопигментов, обладающих вариативными возможностями по требованиям заказчика. Следует отметить, что синтетические пигменты обладают высокой красящей и укрывающей способностью.

Совершенствование технологии использования пигментов в строительных материалах привело к разработке и применению пигментов, которые являются частицами размером менее 100 нанометров. Использование нанопигментов в бетоне имеет ряд преимуществ, таких как более глубокий и насыщенный цвет, улучшенная устойчивость к ультрафиолетовому излучению и долговечность материала [3–9].

Первые эксперименты с использованием пигментов в бетоне начали проводиться в конце двадцатого века. Однако изначально они ограничивались применением в лабораторных условиях и не имели промышленного применения.

С появлением новых технологий и развитием технологий в последние десятилетия использование нанопигментов в бетоне приобрело все большую популярность. С помощью нанопигментов стало возможным достигать широкого спектра цветовых оттенков и создавать уникальные дизайнерские решения для декоративных элементов из бетона.

Благодаря своим маленьким размерам, нанопигменты смешиваются с бетонной смесью на молекулярном уровне, обеспечивая равномерное распределение цвета в материале. Это позволяет создавать более глубокий и насыщенный цвет, превосходящий традиционные пигменты в качестве окрашивания бетона.

Одним из главных преимуществ использования нанопигментов в бетоне является их высокая устойчивость к ультрафиолетовому излучению и внешним воздействиям. Благодаря этому окрашенные пигментами бетонные поверхности сохраняют свою яркость и цветовую стабильность в течение длительного времени.

В недавнем прошлом строительные компании применяли при получении бетонных смесей синтетический каменный материал, полученный на основе

воды, песка и щебня. Смешением этих компонентов получают твердые и прочные композиции. Такие композиции хорошо характеризуют себя при получении фундамента, стен, потолочных перекрытий, облицовочных материалов для внутренних и внешних поверхностей. В настоящее время к строительным материалам предъявляются высокие требования по сроку службы, как правило, не менее десяти лет. В основном они применяются при оформлении приусадебных участков, парков, торговых центров, скверов, находящихся под воздействием агрессивной окружающей среды.

Сегодня использование нанопигментов в бетоне нашло широкое применение в строительной индустрии. Они используются для создания декоративных элементов, таких как плиты тротуаров, стеновые панели, фасады зданий и другие архитектурные конструкции. Железооксидные нанопигменты открывают новые возможности для дизайнеров и архитекторов, позволяя им создавать уникальные и визуально привлекательные элементы из бетона.

В целом, использование пигментов на основе смеси Fe (II) и Fe(III) в бетоне представляет собой современную технологию, которая позволяет достичь высокой эстетической привлекательности и долговечности окрашенных бетонных поверхностей. Эта технология продолжает развиваться, и ожидается, что в будущем ее применение в строительстве и дизайне будет становиться все более распространенным и инновационным.

Промышленное производство наноматериалов при проведении отделочных работ в настоящее время стремительно растет. Большой спрос имеют изделия из декоративных цементных бетонов, основным недостатком которых является невысокая стойкость в агрессивных средах, в условиях с переменным изменением температуры, таких как замораживание и оттаивание, а также устойчивость к ударным и истирающим воздействиям. Поэтому получение смесей для изготовления декоративных бетонных изделий с улучшенными характеристиками является актуальной и перспективной задачей.

На сегодняшний день в нашей стране не существует нормативных документов и стандартов качества использования пигментов при окраске декоративно-бетонных и других строительных материалов. Европейские компании используют при производстве данных материалов международный стандарт EN 12 878 «Пигменты для окрашивания строительных материалов на цементном и известковом вяжущем» [10–11], Соединенные Штаты применяют стандарт ASTM C 979 «Pigments for Integrally Colored Concrete» [12]. При применении данных стандартов учитывают влияние пигмента на время затвердевания цементной смеси и на прочность конечного продукта.

Анализ исследований, которые относятся к области применения нанопигментных добавок в бетоны и декоративные смеси, показывает, что это тема малоизучена и является интересной и полезной с точки зрения утилизации производственных отходов.

В связи со спросом населения с каждым годом уделяется все больше внимания строительству как гражданских, так и общественных объектов, скверов и парков, где неотъемлемой частью отделки являются декоративно-бетонные материалы различной цветовой гаммы [13–20].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В работе предложен способ экологичной переработки катализаторных отходов гидрирования непредельных углеводородов с получением ценного продукта – нанопигмента. Пигмент – железоксидная нанодобавка – улучшает прочностные свойства бетонов и позволяет получить яркие однотонные бетонные массы. Снижение высолов также является положительным моментом ее использования.

Одним из широко применяемых в декоративном бетоне пигментом является железоксидный пигмент. Необходимо отметить некоторые особенности железоксидных пигментов и их применение в декоративном бетоне. Именно железоксидные пигменты предлагают широкий спектр цветов, включая оттенки красного, желтого, коричневого и черного. Это позволяет дизайнерам и архитекторам выбирать подходящий цвет для создания эстетически привлекательных и индивидуальных поверхностей из декоративного бетона. Кроме того, они обладают высокой устойчивостью к воздействию ультрафиолетовых лучей, к выцветанию, влаге, химическим реагентам и механическому износу. Это делает их идеальным выбором для использования в открытых пространствах, включая фасады зданий, тротуары, площадки и другие элементы ландшафта. Немаловажным является экологическая безопасность. Железоксидные пигменты как нанонаполнители являются экологически безопасными и не содержат тяжелых металлов или вредных химических соединений. Они не оказывают негативного влияния на окружающую среду и здоровье людей, что делает их предпочтительным выбором для использования в строительстве и ремонте. В данной работе применяется железоксидный пигмент, полученный из отработанного железосодержащего катализатора, что усиливает привлекательность работы в связи с решением проблем утилизации твердых отходов производства и получением экологически чистых продуктов для строительства.

Отработанные железоксидные катализаторы в зависимости от их модификации порядка до 80%

содержат оксиды железа в виде гематита и магнетита. Водорастворимые составляющие катализатора образуют щелочную среду. Освобожденный от водорастворимых компонентов с последующей сушкой и размолот в дезинтеграторе до 3–20 мкм продукт представляет собой смесь оксидов железа в виде Fe_2O_3 и Fe_3O_4 .

Среда портландцемента является щелочной, поэтому вводимая в нее добавка должна быть устойчивой к щелочной среде. А при подготовке шихты необходимо учитывать покрывающую способность, не снижающую прочностные характеристики декоративно-бетонных изделий, а также с учетом нормы расхода вяжущего [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наиболее востребованными цветами для потребителя являются желтый, красный, коричневый и черный. Полученный нами нанопигмент из отработанного железоксидного катализатора представляет собой красно-коричневый продукт, характеристики которого представлены в табл. 1.

В Европе используются пигменты фирмы «Байер». Эти пигменты демонстрируют высокое качество, но являются очень дорогостоящими, таким образом, при масштабном применении в производстве строительных материалов, в частности, декоративно-бетонных изделий, приводит к высоким затратам для потребителя.

Привлекательностью предлагаемого нанопигмента является его низкая стоимость за счет использования в качестве сырья отработанного железоксидного катализатора.

Оценка качества полученного пигмента в качестве нанонаполнителя для декоративно-бетонных изделий проводилась путем приготовления бетонных изделий с последующим тестированием полученных

Таблица 1
Физико-химические показатели пигмента, полученные из отработанных железоксидных катализаторов

Наименование показателя	Пигмент
1. Содержание Fe_2O_3 , % масс.	83,79
2. Растворимые в воде соединения, % масс	0,7996
3. pH водной вытяжки	6,0
4. Остаток после сухого просеивания на сите с сеткой 016, %	1,3

образцов по следующим показателям: тестирование механических свойств, таких как прочность, цветность, водопоглощение, устойчивость к изменениям в климатических условиях, таких как жаро- и морозоустойчивость.

Для этого проводили серию экспериментов, включающих приготовление бетонных изделий с различными концентрациями пигментов.

Для приготовления материала использовали компоненты, такие как: цемент марки М500, суперпластификатор С3 ОПТИЛУХ (ОПТИЛЮКС) для бетонов и строительных растворов (соответствует требованиям ГОСТ 24211), нанопигмент (из отработанного железоксидного катализатора), вода [21].

Приготовление бетонной смеси проводили в лабораторной перемешивающей установке. Время перемешивания составляло 2–3 минуты. Готовая бетонная смесь укладывалась в форму для создания образцов. Все образцы твердели в естественных условиях.

Получение спектра цветов зависит от количества добавленного пигмента. Нами было изучено влияние количества пигмента в диапазоне 3,3÷40% масс. с получением изделий цветовой гаммы от светло-коричневого до темно-коричневого. Рецепт приготовления образцов представлена в табл. 2.

При добавлении пигмента выше 40% было невозможно получить образцы бетонных изделий с однородной гладкой поверхностью. Для дальнейших исследований были отобраны образцы с содержанием пигмента 3,3, 16,67, 26,67 и 40%.

Для проверки морозоустойчивости образцы изделий помещали в морозильную камеру на 2,5 ч. при температуре минус 18±2°С. Затем образцы размести-

ли друг от друга на 20 мм и подвергли оттаиванию. Образцы после насыщения водой осушили тканью и поместили на расстоянии друг от друга и стенок на 20 мм в морозильной камере. Далее включили камеру и начали медленно понижать температуру. Начальная температура замораживания образцов 16°С.

Исследуемые образцы после завершения заморозки положили в ванну и подвергли оттаиванию при температуре плюс 20–22 градуса.

Расчеты:

1. Расчет изменения массы образцов Δm по формуле

$$\Delta m = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100,$$

где m – масса образца до замораживания и оттаивания, г;

m_1 – масса образца после замораживания и оттаивания, г.

Среднее максимально допустимое уменьшение массы образцов не должно превышать 2%.

По результатам, представленным в таблице, требованиям соответствуют образцы с концентрацией пигмента 13,3 и 26,6%.

Проверку изделий на водонепроницаемость проводили путем погружения образцов в тару с водой на 24 часа. После прохождения данного времени были сделаны следующие наблюдения:

- образцы не окрашивают поверхности, с которыми взаимодействуют;
- визуально изменений не произошло;
- вода, в которой находились образцы, не имеет изменений в окраске;

Таблица 2

Рецептура приготовления образцов

Пигмент, г	Цемент, г	Песок, г	Вода, мл	Процентное содержание пигмента, %
2	20,05	37,96	15	3,3
4	19,35	36,65	15	6,67
6	18,66	35,34	15	10
8	17,97	34,03	15	13,3
10	17,28	32,72	15	16,67
12	16,59	31,41	15	20
14	15,9	30,10	15	23,3
16	15,21	28,79	15	26,67
18	14,52	27,48	15	30
20	13,82	26,18	15	33,3
22	13,13	24,87	15	36,67
24	12,44	23,56	15	40

— прочностные характеристики образцов, с концентрацией пигмента 3,3, 13,3 и 26,6 % соответствовали требованиям по ГОСТ 10180-90 [22].

Полученные образцы подвергались испытанию на жаропрочность.

Образцы поместили в сушильный шкаф с установленной температурой 50°C на 3 часа. После охлаждения образцов в естественных условиях были сделаны следующие выводы: визуально изменений не было выявлено; при механическом воздействии (рук) не было выявлено разрушений; следов при соприкосновении с поверхностями не оставляют.

Определение прочности изучаемых образцов вели согласно ГОСТ 10180-90.

Исследование образцов бетона на прочность заключается в замере минимальных усилий, разрушающих предварительно приготовленные декоративно-бетонные образцы, приготовленные согласно нормативным документам. Все образцы подвергались изучению прочностных характеристик после того, как были выдержаны при пониженных и повышенных температурах. Образцы декоративного бетона, находясь в покое, подвергались статическому нагружению, увеличение нагрузки происходило постепенно, после было вычислено напряжение при данных условиях и выдвинуты предположения упругой работы полученных материалов. Результаты лабораторных исследований полученных образцов

на прочность после испытаний на жаропрочность и морозостойкость представлены в табл. 4.

Результаты исследований свидетельствуют, что добавление в состав бетонной смеси железистого нанопигмента увеличивает прочность изделий и не изменяет свойств полученных образцов при испытаниях на жаропрочность и морозостойкость. Однако при введении нанопигмента в количестве 40% образцы крошатся.

Пигмент на основе внесенной нанодобавки, помимо красящих свойств, на начальных стадиях смешения заполняет декоративно-бетонный материал, образует центры кристаллизации, так называемые зародыши, далее рост кристаллов, их упрочнение.

Исследования в данной области отмечают, что получающиеся наночастицы, состоящие из гидратированной окиси железа, находятся в α -форме.

α -форма гидратированной окиси железа является зародышем, которые инициируют процессы образования кристаллов и участвуют в формировании структурности материала. Это два фактора, которые больше всего влияют на цветовую гамму получаемого нанопигмента. Например, для того чтобы получить более яркие оттенки и добиться чистоты цвета, необходимо получать тонкодисперсные нанопигменты. При укрупнении частиц цвет пигмента становится тусклым. Поэтому следует понимать необходимость предварительного размола перед использованием, так

Таблица 3

Результаты исследований образцов на морозостойкость

Процентное содержание пигмента в образце	Масса образца без испытаний (г)	Масса образца после испытания, (г)	Изменение массы образцов, (г/%)
3,3%	62,2	60,4	2,2/3,5%
13,3%	61,5	60,5	1,0/1,6%
26,6%	60,4	59,7	0,7/1,1%
40%	60,1	58,4	1,7/2,8%

Таблица 4

Результаты исследований образцов на прочность

Количество нанопигмента в образце, г	Процентное содержание пигмента в образце, %	Сжатие (образец до испытаний на жаропрочность и морозостойкость) МПа	Сжатие (образец после испытания на жаропрочность), МПа	Сжатие (образец после испытания на морозостойкость), МПа
0	0	52,6	52,6	52,7
2	3,30	52,2	52,2	52,0
10	16,6	53,9	53,9	53,6
16	26,6	54,0	54,0	54,4
24	40,0	52,2	52,2	52,2



Рис. 1. Образцы бетона, полученные на основе белого цемента с содержанием железоксидного нанопигмента

как не исключены процессы слеживания пигмента. Лабораторные испытания показали, что при формировании шихты с использованием серого цемента внесенный пигмент улучшает эксплуатационные характеристики бетонов. Следует иметь в виду, что наиболее четкие оттенки декоративно-бетонных материалов можно получить лишь при использовании белого цемента. Разница в использовании серого или белого цемента минимальна при получении коричневого либо красного бетона. При получении черного бетона предпочтительней использовать серый цемент.

Согласно статистическим данным, кирпично-красный оттенок декоративно-бетонных материалов обладает наибольшим спросом среди потребителей. Полученный нами на основе оксида железа нанопигмент является наиболее перспективным с точки зрения его производства в промышленных масштабах. Получить образцы с достаточно интенсивной окраской возможно уже при незначительном его содержании (3–4 %). Данный факт, несомненно, обладает экономической привлекательностью с точки зрения его практического применения (рис. 1).

Согласно проведенным исследованиям, по интенсивности окраски все образцы могут быть предложены потенциальным потребителям в зависимости от их предпочтений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Получение железоксидного нанопигмента из отходов процессов дегидрирования олефинов дает возможность не только снизить экологическую нагрузку, но и получить ценный продукт – красящий пигмент, широко применяемый в производстве строительных материалов. При введении железоксидного пигмента в состав бетонной шихты для про-

изводства декоративно-бетонных изделий удалось получить следующие результаты:

- введение в бетонную смесь железоксидного нанопигмента кирпично-красного цвета в количестве от 3,3 до 23,0% сопровождается увеличением прочности до 53–54 МПа, тогда как прочностные характеристики бетонных изделий без введения пигмента оказались менее прочными;
- введение в бетонную смесь железоксидного нанопигмента позволило снизить расход сырья;
- варьированием процентного содержания красящего пигмента возможно регулировать интенсивность цвета в соответствии с требованиями потребителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показана возможность применения железоксидного нанопигмента как красящей добавки, улучшающей прочностные характеристики декоративно бетонных изделий. Установлено, что при добавке железоксидного нанопигмента от 16...26% удастся получить образцы с наилучшими прочностными характеристиками декоративно-бетонных изделий. Кроме того, снижение затрат на покупку цемента класса В25 при добавлении в бетонные смеси позволит увеличить твердение и прочность за счет введения железоксидного нанопигмента до 26%.

Актуальна организация производства в промышленных масштабах железоксидных нанопигментов на основе отходов нефтехимических процессов для применения их не только в качестве красящих и прочностных добавок в производстве декоративно-бетонных изделий, но и при производстве других строительных материалов в промышленных масштабах с использованием региональных ресурсов.

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ASTM C979 Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete.
2. Пискарев В.А. Декоративно отделочные строительные материалы. М.: Высшая школа, 1977. 213с.
3. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Development of technology for obtaining anticorrosive nanostructured polyalkenylamide-succinimide coatings in construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(1):6–13.
4. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Method of obtaining calcium silicate for construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(6):350–357.
5. Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Obtaining the retainer for waterproofing road bitumens. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(5):319–327.
6. Brunauer S., Grenberg S. A. *Chemistry of Cement*; 1960.
7. Шинкарева Е.В., Кошевар В.Д., Жигалова О.Л., Зонов Ю.Г. Использование промышленных отходов при получении керамических пигментов // Стекло и керамика. 2006. № 12. С. 26-28.
8. Герасимов Л.Г., Лазарев И.В., Алексеев А.И., Галтнурова Л.А. Пигменты и наполнители из техногенных отходов // Строительные материалы. 2002. № 4. С. 32-34.
9. Седелникова М.Б., Погребенков В.М., Горбатенко В.В., Коуцман Е.Я. Керамические пигменты для строительной керамики // Стекло и керамика. 2009. №9. С. 3-7.
10. Белов Н.В. Очерки структурной минералогии. М.: Недра, 1976. 344 с.
11. Шаяхметов Р.З., Яковлев В.В. Строительные пигменты из шламов водоочистки // Строительные материалы. 2008. Т 12. С. 32-33.
12. EN 12878:2005 Pigmente zum Einfarben von zement und / oder kalkgebundenen Baustoffen. Anforderungen und Prüfverfahren.
13. Пин В.М., Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K. Development of heavy metal-based nanostructured complex technology for use in building mortar. *Nanotechnologies in Construction*. 2022. 14(5):398–404.
14. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2007.
15. Белан В.И. Цветные цементы и их производство в Новосибирской области / В.И. Белан // Экология и ресурсосбережение в материаловедении. Новосибирск. 2000. С. 8–10.
16. Боженков П.И., Холопова Л.И. Цветные цементы и их применение в строительстве. Л. 1968.
17. Вилков С.М. Исследование процесса высолообразования при гидратации декоративного портландцемента и разработка методов его снижения : автореф. дис. канд. техн. наук. Свердловск, 1979.
18. Воронин В.В. Морозостойкость и технология бетона с модифицированным поверхностным слоем. Автореф. дис. д-ра техн. наук. М., МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1985.
19. ГОСТ 16872–78 Пигменты неорганические. Методы определения относительной красящей способности
20. *Decorative concretes using local materials and industrial waste for small architectural forms* / N.I. Slesareva, G.D. Kovalenko, V.A. Krasnyuk. Overview information of the Ministry of Housing and Communal Services. М.; 1986 (3).
21. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов.
22. ГОСТ 10180-90 Методы определения прочности по контрольным образцам.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аминова Эльмира Курбангалиевна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Общая химическая технология», Институт химической технологии и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке, Башкортостан, Россия, k.elmira.k@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3105-3477>

Касьянова Лилия Зайнулловна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Общая химическая технология», Институт химической технологии и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке, Башкортостан, Россия, kasyanova-liliya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1831-2793>

Исламутдинова Айгуль Акрамовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общая химическая технология», Институт химической технологии и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке, Башкортостан, Россия, aygul_ru@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2097>

Асфандиярова Лилия Рафиковна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общая химическая технология», Институт химической технологии и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке, Башкортостан, Россия, asfand_liliya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-201X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Аминова Э.К. – литературный обзор; проведение экспериментальной части.

Касьянова Л.З. – научное руководство; итоговые выводы.

Исламутдинова А.А. – концепция исследования; написание исходного текста.

Асфандиярова Л.Р. – обработка и анализ экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.



LYOPHOBIC SOLS «БЕТОПРЕСС»® AS ADDITIVES TO CHEMICAL ADMIXTURES INTO CONCRETE

"The only way to successfully compete with advance nations is the development of scientific knowledge and cutting-edge technologies, including nanotechnology and in establishing an industry based on scientific and technological innovations. There is no other way!" – the words of the Nobel laureate, and academician Zhores I. Alferov.

The article presents an innovative approach to enhancing cement concrete, bordering on a scientific breakthrough, and explains it in a way that is easy to understand. The core concept is the integration of a reactive agent with a chemical fluid to augment the material and endow it with novel characteristics. The technique, as suggested by the author, involves utilizing lyophobic sols that they have formulated as admixtures, combined with aqueous solutions of chemical additives produced by Russian companies. Due to the inclusion of these Nanostructured sols in the chemical additives, heavy cement concrete treated in this manner shows remarkable resilience. It remains unaffected by repeated freeze-thaw cycles, even when immersed in saline or mineral-rich waters. Furthermore, this advanced concrete does not demand any special measures for protection, maintenance, or repair, nor does it require additional waterproofing.

An additive is defined as ‘a substance added to a liquid to improve its properties or give new ones,’ in accordance with GOST R 51109-97 6.3.3. Extalin (M-methylaniline) holds the distinction of being recognized as the world's first additive, introduced in 1919. Over the past century, approximately 60 different types of additives have been developed, yielding significant economic and technological benefits for many developing nations, including Russia. Nevertheless, these additives have found their applications solely within fuel and engine oils."

Speaking of other industries, such as construction, is it possible to introduce additives into concrete mixtures? The answer is an emphatic no! – if we reference the specified GOST (State Standard), it states clearly that “a substance added to a liquid...” does not apply here because we are dealing with a mixture. However, this mixture can and should be enhanced with admixtures, including both chemical and mineral varieties, to improve its properties. This applies not just to the mixture in its initial form but also to the concrete as it hardens. While additives are usually applied in sparing amounts, admixtures are actually used quite substantially in contrast to their seemingly limited efficiency in some cases. The question then arises: Can we expand the effectiveness of these admixtures while simultaneously endowing them with new characteristics across the board?

Yes, we can achieve this! All components – including the same additives – are usable. The chemical additive's



aqueous solution serves as the ideal medium for incorporating the desired active ingredient. Upon dilution with water, every component of the chemical additive dissolves completely to the molecular and ionic level, with particles smaller than one nanometer, thereby creating a true solution within the complex. Introducing a similar ingredient will yield an identical true solution with no novel properties upon dissolution. As the saying goes, let's produce "butter-oil."

Here you will need to add something completely different, for example, a colloidal solution in the form of a lyophobic sol is ideal. In our version, the sol is not just a true solution consisting of molecules and ions, but a liquid, in this case water, where particles of metal (iron hydroxide) or semimetal (silicon dioxide) with sizes from 1 to 100 nanometers in a stable state and in the presence of surfactants are evenly distributed over the entire volume. Such a sol will perfectly cope with the role of an additive introduced into the liquid for improving its properties and give it new properties (GOST R 51109-97).

The primary challenge we face in our country is the lack of scientific and technical advancements in colloidal chemistry that could be applied to sol modification techniques for chemical additives in concrete. Specifically, there's a scarcity of sols that are both stable and capable of interacting effectively with cement.

Despite this, for over a decade, our company, "НПО БЕТОХИМИКС"[®] based in Simferopol, has been actively engaged in the development, production, and distribution of ash and sol modifiers to a select group of partners, many of whom have been with us since the beginning of our activities. We are an innovative enterprise; we have never produced for import substitution, primarily because there was never a foreign analogue to replace. Hydrosols, as industrial nanomaterials, have not and will not be imported into Russia, mainly due to their non-existence in Western markets.

Our company possesses these rare hydrosols and can readily supply them to all interested parties. The demand for our stabilized hydrosols from the "БЕТОПРЕСС"[®] series is remarkably low – only 0.005% of the dry substance is required relative to the weight of cement, and this is the maximum! As it stands, we are the sole Russian provider that offers sol or sol modifiers easily accessible for both research purposes and the industrial production of chemical additives and cement concrete.

Upon the introducing the sol into the chemical additive, the additive undergoes a transformation, shifting from a mere common substance to a sol-modifier with a whole range of enhanced characteristics. These changes affect not only the compound but also the concrete mixture. As a consequence, concrete that contains this sol-modifier transcends to a higher category, earning the new classification of nanostructured concrete. This is attributable to the fact that the active particles within





the sols measure between 1 to 100 nanometers in size, which aligns with the standard definition of nano-objects, specifically nanoparticles.

Nanoparticles, with the concrete mixture as part of a chemical additive, become artificially introduced centers of crystallization, from which a spatial three-dimensional grid in the form of a matrix is generated and quickly formed, the material for its forming is the cement hydration products themselves. As a result, integrating our silica “Flux-1GF” into cement concrete as part of any polycarboxylate superplasticizer composition – using just 5 grams (dry weight) per 100 kilograms of cement – induces a qualitative transformation. This addition promotes the development of a unique matrix within the concrete, rendering it waterproof with at least a W16 rating, and reducing its water absorption to no more than 1%!

This has been extensively outlined in our earlier publications, where it is substantiated by test reports. Hence, there's no need to reiterate the same here. Regrettably, the true significance and novelty of the information presented in those articles seem to be lost on the readers, as evidenced by the utter lack of enthusiasm for both the subject of sol modification of chemical additives and our cutting-edge offerings – which, at present have no alternative.

Is it indifference, incompetence, or merely the clichéd disbelief that a small city like Simferopol could give rise to something truly innovative – not even Moscow or St. Petersburg have achieved? Given that we are all well-informed, it is most likely the latter: disbelief! Such achievements have often been eloquently described as if they were fictional... but not in our case. We exist. For over 11 years, we have been developing and successfully producing both colloidal solutions and sol modifiers, exclusively using domestic raw materials.

Our journey is evidenced by the first official laboratory test report of our sol modifier, “БЕТОПРЕСС”® Vibrofinish—a calcium stearate aqueous suspension used in the manufacturing of rigid concrete products via vibro-compression, which dates back to 2012.

The pure sols themselves may not be able to directly replace chemical additives in concrete, but they offer an opportunity to enhance the quality of cement concrete's chemical composition. Stabilized sols can be combined with various chemical additives either during their manufacturing process or just before the mixing of concrete on-site or at a stationary concrete batching plant. It is also feasible to introduce sols into the concrete mix at a proportion of merely 5 grams (dry substance) per 100 kilograms of cement as the sole additive, simply by mixing with water, provided that the production process can accommodate this method.

In absolutely any of these variants, the final product is nanostructured concrete. Take, for instance, the silica sol ‘Flux-1GF,’ which in this case acts singularly as a PMD-8* replacement. A mere 5 grams (of dry sub-

stance) per 100 kilograms of cement is sufficient: Once the concrete cures, it transforms from a typically hydrophilic material into a hydrophobic one. Concurrently, its compressive strength is enhanced by 25%. Just 5 grams is all it takes for this concrete to reliably develop strength, even in temperatures as low as -8°C . This exemplifies the practical nanostructuring of cement-based concrete.

Scientific and technical advancements in the formulation and application of colloidal mortars as enhancements to chemical admixtures in concrete represent a high-priority area. Such developments are crucial for any nation, arguably as significant as the well-established domain of fuel additives. This holds even greater importance for an expansive country like Russia. The focus here extends beyond merely enhancing the properties of domestic chemical admixtures and the concrete quality. It also signifies a systematic and qualitative transformation of the construction industry at large. Our range of colloidal solutions and sol modifiers exhibits remarkable longevity, maintaining their properties unaltered for extended periods, potentially spanning years.

Nanostructured concretes exhibit enhanced durability during freezing-thawing cycles and remain stable even when exposed to salts. They do not require protection and waterproofing treatments. Furthermore, these materials require minimal ongoing maintenance and repair, an attribute particularly beneficial for constructing critical infrastructure such as harbor facilities, breakwaters, docks, bridges, canals, dams, cooling towers, roadways, subways, airfields, and other key infrastructure. While lyophobic sols are not a direct substitute for chemical additives in concrete, they serve to elevate and transform the performance of these additives to a new level – with nanoparticle precision – as part of cutting-edge industrial sol modifiers, integrating seamlessly into a unified additive formulation!

The number of chemical additives in concrete produced in Russia has long exceeded four hundred, and all of them are, when diluted with water, true solutions that can be easily modified with sols of the “БЕТОПРЕСС”® series. And since we have five such sols, and each of them has its own special purposeful action, the total amount of chemical additives available should also be multiplied by five.

Consequently, our country, hitherto lacking any industrial nanomaterials, is positioned to gain a substantial advantage by acquiring an immediate assortment of two thousand diverse sol modifiers, on the basis of the integration of domestic chemical additives into concrete mixtures. Such a leap forward will empower our construction sector to exclusively build with nanostructured concrete – that would set us ahead of any developed country globally. Unfortunately, despite 11 years of persistent efforts and informative publications, not a single state institution responsible for development in



the construction field or the broader industrial sector, including numerous scientific bodies, has acknowledged the significant contributions our company's innovations could make for Russia today. It's a matter of strategic importance, one might argue!

“НПО БЕТОХИМИКС”® company has the capacity to manufacture and distribute a comprehensive line of five high-performance, versatile sol additives for use in chemical additives for concrete. These additives are highly efficient, with a maximum dosage of just 5 grams per 100 kilograms of cement for ready-mix concrete formulations, utilizing domestically sourced materials.

Moreover, we offer a line of formulation guides for sol modifiers based on polycarboxylate ether. This includes the cutting-edge hyperplasticizer PMD-35*, which is specially designed for enhancing cold weather concrete and requires a maximum of 1.7% dosage (for the liquid product variant). The formulas for these sol modifiers, while not commercial products in themselves, are freely available to all customers who purchase the sol additives. This strategy is aimed at fostering a fast and significant technological breakthrough in the national construction sector, by empowering users with the knowledge and materials needed to drive innovation and efficiency.

General Director

ООО «НПО БЕТОХИМИКС» and ООО «БЕТОХИМИКС ГРУПП»

V.E. Khovansky

+7 978-917-27-97, + 7 978-284-74-55

sale@betohimiks.ru

<https://betopress.ru>

R



ЛИОФОБНЫЕ ЗОЛИ «БЕТОПРЕСС»® В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДОК К ХИМИЧЕСКИМ ДОБАВКАМ В БЕТОН

«Единственный способ успешно соревноваться с передовыми странами – это развитие науки и высоких технологий, в том числе, нанотехнологий и создание промышленности на научно-технических разработках. Другого пути нет!» – слова нобелевского лауреата, академика Ж.И. Алфёрова.

В статье в доступной форме раскрывается новое направление в химизации цементных бетонов на уровне научного открытия. За основу взята сама идея присаживать реакционно активное вещество к химической жидкости с целью улучшения ее и придания ей новых свойств. В данной технологии автор статьи в качестве присадок предлагает использовать разработанные им лиофобные золи, а в роли жидкостей – водные растворы химических добавок российских производителей. Тяжелые цементные бетоны, наноструктурированные стабилизированными золями, находящимися в составе химических добавок, не подвержены разрушению даже после множества циклов замораживания и оттаивания в морской или минерализованной воде, не требуют специальной защиты, ухода, ремонта и не нуждаются в гидроизоляции.

Присадка – «вещество, добавляемое в жидкость для улучшения ее свойств или придания ей новых свойств» (ГОСТ Р 51109-97 6.3.3). Первой в мире присадкой был заявлен Эксталин (М-метиланин) в далеком 1919 году. За все 100 с лишним лет было разработано порядка 60-ти типов различных присадок, что дало возможность многим развивающимся странам, включая саму Россию, получить от их применения ощутимый экономический и технологический эффект. Правда все они нашли свое назначение лишь только в топливе и в моторном масле.

А как же в других отраслях? Например, в строительстве? Можно ли и в бетонную смесь вводить (присаживать) присадки? Ответ – нет! В вышеуказанном ГОСТе четко определено: «вещество, добавляемое в жидкость...» – а тут смесь, но в нее можно и нужно вводить добавки как химические, так и минеральные, и тоже для улучшения свойств, а в данном случае не только самой смеси, но и твердеющего бетона. Добавки в сравнении с мизерными дозировками присадок расходуются реально большим количеством, имея при этом довольно ограниченную эффективность. Можно ли расширить эффективность и в то же время придать всем им (добавкам) без исключения новые свойства?

Можно! Все теми же присадками! Водный раствор химической добавки и есть та самая жидкость, в которую можно присадить нужное активное веще-





ство. Все компоненты любой химической добавки после ее разбавления водой полностью растворяются до молекул и ионов с размерами менее одного нанометра и образуют в комплексе истинный раствор. При попытке присадить к нему любой подобный ингредиент мы после его растворения получим все тот же самый истинный раствор и абсолютно ничего нового. Как говорится, произведем «масло масляное».

Здесь потребуется присадить что-то совсем иное, к примеру, идеально подойдет коллоидный раствор в виде лиофобного золя. В нашем варианте золь – это не только просто истинный раствор, состоящий из молекул и ионов, а жидкость, в данном случае, вода, по всему объему которой также равномерно распределены и частицы металла (гидроксида железа) или полуметалла (диоксида кремния) с размерами от 1-го до 100 нанометров в стабильном состоянии и в присутствии ПАВ. Такой золь прекрасно справится с ролью присадки, добавляемой в жидкость для улучшения ее свойств и придания ей новых свойств (ГОСТ Р 51109-97).

Проблема лишь в том, что у нас в стране нет подобных научно-технических разработок в области коллоидной химии, которые можно было бы применить в технологии золь-модификации химических добавок в бетон, имеется в виду – самих зольей, способных быть стабильными и эффективно работать с цементом. Все публикации за последние двадцать лет, вещавшие российскому обществу о создании и успешном внедрении в производственных условиях в бетон того или иного лиофобного золя, на сегодня оказались просто ничем не подтвержденными сообщениями, так как в них желаемое выдавалось за действительность, и только с одной целью – привлечь к себе внимание. Абсолютно все! Подобные сообщения и сейчас не прекращают периодически появляться на просторах интернета. А что есть, кроме них? Есть научные семинары и конференции, статьи и доклады, диссертации, ТУ, успешно «освоенные» гранты и даже патенты, но самого продукта, хотя бы одного, который можно было бы просто купить и в руках подержать, а не только почитать о нем и послушать – нет.

И в то же время в течение уже более десяти лет мы разрабатываем, производим и поставляем золи и золь-модификаторы довольно узкому кругу партнеров, некоторым из них – практически от самого начала нашей официальной деятельности. Мы – это инновационная компания ООО «НПО БЕТОХИМИКС»® (г. Симферополь), которая никогда не занималась импортозамещением, потому что ей нечего было и замещать. В Россию гидрозоль в качестве промышленных наноматериалов не поступали и поступать не будут в связи с полным отсутствием таковых и на западе. А в нашей компании они есть,

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

и мы способны их поставить всем желающим, благо, что расход стабилизированных гидрозольей серии «БЕТОПРЕСС»® достаточно мизерный – 0,005% по сухому веществу к массе цемента, и это для них самый максимум! На сегодня мы единственная российская компания, в которой можно без особых проблем купить золь или золь-модификатор как для исследования, так и для промышленного производства химических добавок и цементных бетонов.

Сразу после присадки золь к химической добавке последняя, получая иной статус, автоматически превращается из обычного рядового продукта в золь-модификатор с целым комплексом дополнительных свойств, изменяющих не только сам продукт, но и бетонную смесь. Бетон с золь-модификатором также переходит на иной уровень и получает свою новую классификацию – наноструктурированный бетон, так как по-настоящему активные частицы, находящиеся в золях, обладая размерами в пределах от 1-го до 100 нанометров, подпадают под общепринятое определение нанобъектов в виде наночастиц.

Наночастицы, поступая в составе химической добавки в бетонную смесь, становятся искусственно привнесенными в нее центрами кристаллизации, из которых зарождается и быстро формируется пространственная трехмерная сетка в виде матрицы, материалом для построения которой служат сами продукты гидратации цемента. При этом происходит качественное изменение цементного бетона, к примеру, с введением в него в составе любого поликарбонатного гиперпластификатора нашего кремнезоля «Флюкс-1ГФ» в количестве всего 5 грамм (по сухому веществу) на 100 килограмм цемента, бетон за счет образования в нем особой матрицы становится водонепроницаемым не менее, чем до показателя W16 и с водопоглощением – не выше 1-го %!

Все это уже было достаточно подробно описано в наших предыдущих статьях, и в них же подтверждено протоколами испытаний. Поэтому здесь повторяться нет смысла. Жаль только то, что настоящую важность и уникальность информации из опубликованных статей не удается до конца понять их читающим, практически абсолютно всем, если судить по полному отсутствию всякого интереса как к теме золь-модификации химических добавок, так и к нашим новейшим продуктам и технологиям, которым на сегодня альтернативы нет.

Что это? Безразличие, некомпетентность или просто банальное неверие в то, что в таком небольшом городе, как Симферополь, можно создать что-либо особо инновационное, чего не смогли осилить ни в Москве, ни в Санкт-Петербурге? А так как у нас все поголовно грамотные, то, скорее всего, последнее – неверие! Ведь уже столько раз красиво писали о подобных достижениях, которых как не было, так



ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ



и нет. Но только не в нашем случае. Мы существуем, мы разрабатываем и успешно производим как коллоидные растворы, так и сами золь-модификаторы вот уже более 11-ти лет, и только из отечественного сырья. Первый официальный протокол лабораторных испытаний нашего золь-модификатора в виде водной суспензии стеарата кальция – «Бетопресс® Виброфиниш» как продукта, применяемого для производства изделий из жесткого бетона методом вибропрессования, датируется 2012 годом.

Сами золи в своем чистом виде не могут напрямую конкурировать с химическими добавками в бетон в качестве их замены, но могут стать для последних успешным шансом выйти на иной, более высокий и качественный уровень в химизации цементных бетонов. Стабилизированные золи можно присаживать к любым химическим добавкам как при их производстве, так и перед самим процессом приготовления бетона в условиях строительного объекта или же стационарного бетоносмесительного узла. Также вполне возможно введение золя из расчета всего 5 граммов (по сухому веществу) на 100 килограммов цемента в качестве единственного продукта, просто вместе с водой в бетонную смесь и без химической добавки, если производственная технология это позволяет.

Абсолютно в любом из этих вариантов, в конечном результате, мы получаем наноструктурированный бетон. Опять пример и снова – кремнезоль «Флюкс-1ГФ», который в данном случае в одиночку сработает и как ПМД-8*. Всего 5 грамм (по сухому веществу) на 100 килограммов цемента, и бетон после своего твердения из обычного гидрофильного превращается в гидрофобный, при этом его прочность на сжатие увеличится на 25%. Достаточно будет 5-ти грамм, чтобы этот бетон спокойно набирал прочность в мороз до –8°C! Это и есть практическое наноконструктурирование цементного бетона.

Сами научно-технические разработки по производству и внедрению коллоидных растворов в качестве присадок к химическим добавкам в бетон очень приоритетны и также не менее важны для любого государства, чем известная технология присадок к топливу, а тем более для такого огромного, как наша Россия. Это не только улучшение свойств любых химических добавок от наших производителей и самих бетонов, но и последовательное качественное изменение всей строительной индустрии в целом, и, конечно же, появление новых технологий и материалов должно положительно отразиться на самой экономике и повысить престиж страны. Тем более что мы добились полного сохранения стабильности наших продуктов как золь-модификаторов, которые могут храниться, не меняя своих свойств годами.

Наноструктурированные бетоны не подвержены разрушению при замораживании и оттаивании, даже в солях не требуют защиты и гидроизоляции, не требуют постоянного ухода и ремонта, что особенно важно при возведении портовых сооружений, волнорезов, причалов, молов, мостов, каналов, плотин, градирен, дорог, метрополитенов, аэродромов и других стратегически важных объектов. Лиофобные золи не заменяют химические добавки в бетон, а только лишь модифицируют их до иного, более высокого уровня, до уровня нано в виде новейших промышленных золь-модификаторов, образуя с ними (добавками) единую формулу!

Количество наименований химических добавок в бетон, производимых в России, уже давно перевалило за четверсто, и все они представляют собой при разбавлении водой истинные растворы, которые легко можно модифицировать золями серии «БЕТО-ПРЕСС»®. А так как у нас в наличии пять таких зольей и каждый из них обладает своим особым целенаправленным действием, то общее количество имеющихся химических добавок следует также умножить на пять.

В результате чего наша страна, до этого совсем не имея в своем арсенале ни одного промышленного наноматериала, в качестве химической добавки в бетон автоматически получит на базе уже готовых отечественных химдобавок сразу две тысячи разнообразных золь-модификаторов в одночасье. Данное обстоятельство позволит нашим строителям в дальнейшем возводить все здания и сооружения только из наноструктурированного бетона, что будет невозможно ни для одной развитой страны мира, кроме России. Одно плохо, что за все 11 лет нашего существования ни одна государственная структура, отвечающая за развитие строительной отрасли или всей промышленности страны в целом, включая многие и многие научные учреждения, несмотря на все наши попытки и информационные статьи, не соизволила обратить на уже давно существую-

щие разработки компании своего внимания, которые на сегодня очень важны для России, можно сказать, на стратегическом уровне!

Государственным структурам они просто неинтересны, а научно-исследовательским учреждениям наоборот, но не более чем как информационная угроза их научному авторитету. Так как, несмотря на все вложенные государством в них ресурсы, за последние двадцать лет ни один научно-исследовательский коллектив не смог произвести хотя бы одного единственного стабилизированного коллоидного раствора с последующим его внедрением в производство наноструктурированного цементного бетона. При этом само государство взамен ожидаемых от российской науки реальных продуктов за все свои затраченные средства получило неисчислимое количество научных работ и к ним статей на тему зольей, в которых все предельно ясно, просто и замечательно. Вот по ним теперь учат российских студентов, правда непонятно, что это может им дать при полном отсутствии самих продуктов?

Компания «НПО БЕТОХИМИКС»® способна из отечественного сырья произвести и поставить всем желающим в качестве активных присадок для химических добавок в бетон пять полифункциональных зольей разнонаправленного действия с максимальным расходом по сухому веществу 5 граммов на 100 килограммов цемента для литых бетонных смесей. А также рекомендовать целую серию рецептов золь-модификаторов на основе поликарбонатного эфира, включая инновационную гиперпластифицирующую ПМД-35* для холодного бетона с максимальным ее расходом 1,7% (по жидкому продукту). Сами рецепты золь-модификаторов, не являясь предметом для торговли, предоставляются абсолютно всем безвозмездно при приобретении зольей, что, в свою очередь, должно привести к быстрому технологическому прорыву в развитии отечественной строительной индустрии.

Генеральный директор
ООО «НПО БЕТОХИМИКС» и ООО «БЕТОХИМИКС ГРУПП»

В.Е. Хованский

+7 978-917-27-97, + 7 978-284-74-55
sale@betohimiks.ru
<https://betopress.ru>

R

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>

CC BY 4.0

Wood-polymer nano-modified composite materials for construction purposes

Liliya R. Asfandiyarova* , Guzel V. Khakimova , Inna V. Ovsyannikova , Anna Y. Matveeva 

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Bashkortostan Republic, Russia

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

ABSTRACT: Introduction. The advantages of nano-modified composite materials for construction purposes based on polyvinyl chloride (PVC) include enhanced strength characteristics compared to other materials [1]. Composite nanomaterials based on plant resources are versatile materials, whose properties can be modified through additives and processing technology to obtain a wide range of products in various application areas, particularly in construction, decking, outdoor and garden furniture, siding, picket fences, packaging, pallets, and much more. The research aims to investigate the influence of different additives on the technological and operational properties of the resulting composite. Nano-modified composite materials based on PVC are superior to polyolefin composites in terms of stiffness and strength, have high light-resistance as well as resistance to many chemicals, and are comparatively inexpensive as raw materials [2]. **Methods and materials.** The research aims to determine the preparation of composite materials that provide a highly effective stabilizing system against thermal decomposition, which increase the flow properties of the polymer melt, reduce water sorption, and impart sufficiently high outdoor stability; therefore, products made from composite materials can be successfully used in the construction area. **Results.** Research results have shown that the use of nanostabilizers in the technology of producing building materials can ensure preservation and ageing quality of polymer composites. They also have application potential on industrial scale. **Conclusion.** Investigations carried out on the use of a number of nanostabilizers, give to construction composites higher color retention and therefore increase environmental resistance of material.

KEY WORDS: nanostabilizers, wood-polymer composite material, construction

FOR CITATION: Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Ovsyannikova I.V., Matveeva A.Yu. Wood-polymer nano-modified composite materials for construction purposes. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15 (6): 543–551. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>. – EDN: UDJUBI.

INTRODUCTION

In recent years, demand for nano-modified composite materials based on plant resources has grown rapidly in the Russian construction materials market, which is associated with the record pace of construction sector development, especially private housing construction, and a multiple increase in wood prices, which forced buyers to look for more financially and commercially beneficial alternatives.

Nano-modified wood-polymer materials are super-new and topical construction materials including thermoplastics filled with wood pulp, which combine useful qualities of both polymers and plant resources. At that, polyethylene, polypropylene, and polyvinyl chloride are used as plastics. The ratio rating of woodflour to polymer

in the compound can modify its physical and mechanical characteristics.

Polymer composite materials based on polyvinyl chloride (PVC) are currently widely used in various areas of the economy. Main areas of their application are construction, cable industry as well as manufacture of containers and packaging. A particular attention is paid to the use of woodflour in the formulation of composites due to its low cost, large reserves, and non-toxicity.

Pre-eminent manufacturers and consumers of wood-flour-filled PVC products are China, Japan, etc. In Russia, this material is not widely used enough, but its prospects are not questioned. Availability of forest resources and the ever-growing demand for high-quality construction and structural materials are high-powered incentives for the development of this market.

©Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Ovsyannikova I.V., Matveeva A.Yu., 2023

There is great interest in the market of nano-modified construction composite materials in Russia. The number of manufacturers in Russia is growing every year: in 2010, there were only four companies having operated in this sector, then in 2015, there were already more than sixty manufacturers. The leading companies are: Multi-Plast – 3% and Techno-Polymer – 11%.

Main European manufacturers of composite materials are Germany, France, and Finland. The most important reasons limiting the growth of the domestic market are considered to be unformed demand, lack of product homogeneity as well as lack of standards and technical documentation [3].

Nano-modified wood-polymer composites are modern construction materials made on the mixing technology of woodflour, various polymers, and other components. Main way of obtaining nano-modified polymer composites is extrusion. At that, to completely homogenize the mixture resulting in a high-quality moulded product, a twin-screw extruder is used [4–6].

These materials are more weather-proof and much more durable than wood materials, which is important for use in our climatological conditions.

Compared to true lumber products, they have greater resistance to the influence of water and microorganisms as well as effects of the atmosphere. Composite materials are considered to be multifunctional products. Their characteristics are quickly modified, which ultimately makes it possible to produce a wide range of products with different mechanical and aesthetic properties [7–8].

Woodflour is the main component of the composite. In order to facilitate recycling of plastic waste and reduce consumption of forest reserves, development and use of wood-filled plastic products has been widely encouraged in our country in recent years [9].

Polyethylene and polypropylene are mainly used as a polymer matrix in the composition of nano-modified composite materials. As for PVC-based composites, they exceed polyolefin composites in stiffness and strength. They possess high light resistance as well as resistance to chemicals, and comparative low price for raw materials. However, they are characterized by insufficient heat resistance and impact resilience as well as hydrophobicity [10–11].

Therefore, wood-polymer composite materials based on PVC belong to the most promising modern materials having wide performance characteristics, cost-effective production, and relative ease of processing [12–16].

Currently, extrusion is considered to be the most established technology for obtaining products from composite thermoplastic polymers. A great number of foreign companies use this technology to produce profiles and tubular components, etc.

Rawwood, containing cellulose has a porous structure. When exposed to high temperature and pressure, it under-

goes oxidation, and is also an abrasive wear material. In this regard, a number of problems often arise: in particular, adsorption of gaseous substances by sawdust and release of them in the extruder; risk of fires and explosions due to the resulting gas mixture; release of resinous substances from coniferous wood during the sawdust processing.

These disadvantages can be eliminated through using nano-modified additives included in the composite formulation [17]. They consist of the following components:

- external and internal lubricants, which prevent sticking to the extrusion head, increase free mobility, and reduce viscosity;
- bonding and dispersing agent to improve the dispersion of the polymer matrix, and the mechanical properties such as tensile strength, flexural toughness, and impact strength;
- flame retardants which increase fire-resistance of plastics;
- foaming agents, which reduce the weight of wood-polymer composites and facilitate nailing, drilling, fastening, screwing, and cutting during the construction work;
- antioxidants, traditionally used to prevent aging the material during its use;
- impact strength modifiers, which improve weather resistance for outdoor construction;
- fungicides, which protect building products against microorganisms and fungus, as well as ultraviolet stabilizers (UV stabilizers);
- pigments, which protect products from exposure to light rays and prevent their color fading.

In general, nanostabilizers can be divided into two groups: functional and technological ones. Functional nanostabilizers define the behavior of the composite while technological ones affect the process of high-temperature processing of the polymer compound. Main groups of nanomodifiers commonly used in the manufacture of PVC-based materials are stabilizers, lubricants, as well as impact and processability modifiers.

The content of nanomodifiers is about 1–5% by weight of the mixture, but it is they what has a significant effect on the characteristics of the final building product, such as strength, physical configuration, and ageing quality. Therefore, a vital task of today is to investigate the influence of various nanomodifiers on the operating ability of obtained constructional materials.

METHODS AND MATERIALS

The research aims to identify effective nanomodifying components, in particular nanostabilizers, which ensure the integrity of polymers during the processing and operation since fracture of polymers leads to changes in such parameters as viscosity, color, strength, and deterioration of physical and mechanical characteristics.

This group includes antioxidants, temperature and light stabilizers ensuring integrity of polymers in use and processing. The nano-modified antioxidants prevent oxidation during the technological process and operation. These include hindered phenols, alkyl/aryl phosphites, etc.

Main requirements in relation to stabilizing additives are removal of labile chloride groups, absorption of hydrogen chloride, increase in moisture resistance and robustness against oxidation process, as well as low toxicity and low cost.

Currently, nano-thermal stabilizers, which contain toxic substances such as cadmium, lead and barium stearates are strictly limited, therefore the share of non-toxic stabilizers such as calcium stearate and zinc stearate is increasing on the market [18–20].

In addition to the above, shockproof nanomodifiers increasing impact strength of products and giving them ability to withstand sudden loads without destruction, are used in the production of composites. Such nanomodifiers are divided into the following groups: nanomodifiers having a “core-shell” structure (MBS – methacrylate-butadiene styrene, AIM – acrylic nanomodifiers of impact strength), nanomodifiers ABS – acrylonitrile-butadiene-styrene, and nanomodifiers with a semi-compatible network structure (CPE – chlorinated polyethylene, EVA – ethylene-vinyl acetate, NBR – acrylonitrile-butadiene-rubber) [21].

Processing additives or processing nanomodifiers, which simplify the melt processing, are polymers compatible with polyvinyl chloride including those that weaken the restrictions on the motion of polymeric chain and segments. They are necessary to promote the polymer particles decay, ensure homogeneity of the melt as well as afford rapid gelling and desired degree of plasticization.

A wide range of copolymers of methyl methacrylate (MMA) with styrene, acrylate, methacrylate, and *m*-vinyl lactam, MMA and glycidyl methacrylate, MMA and acrylic acrylates, and other can be used as additives [22].

The above nanoadditives provide reduction of friction during the processing. According to the mechanism of action, they are divided into internal, external, and mixed actions. In particular, the first group of nanomodifiers thermodynamically compatible with the polymer; they reduce intermolecular interaction force and, therefore, viscosity of the polymer.

Externally acting lubricants facilitate the processing of polymer through switching the mode from shear sliding to “plug” sliding mode. It should also be noted that due to insufficient compatibility with the polymer, they are released during the processing at the melt-metal interface and decrease adhesion of polymer to the metal surface of processing equipment [23].

The necessity to use nanomodifiers is determined based on the requirements for the final products depend-

ing on their operating conditions and fabricability in processing, which in turn depend on the design features of the extrusion line.

Composite materials based on the plant components are finding an ever increasing commercial use in construction industry. An important in-use performance of this material is its long-term strength outdoors.

Under the influence of ultraviolet irradiation as well as in the presence of oxygen and moisture, the polymer undergoes very rapid dehydrochlorination and peroxidation resulting in formation of polyenes, which leads to a sharp change in the mechanical properties of the polymer [24].

Investigations of effecting of nanostabilizers on the technological and operational properties of composite materials were carried out at a mass ratio of PVC : wood-flour – 1:1.

The wood-polymer composition was obtained by mixing the components in the high-speed mixer when heated to 120°C; then, the obtained polymer mass was cooled to the temperature of 40–60°C and melted down by means of laboratory extruder to obtain a chunk. Test samples (granules) were obtained from the chunk by rolling. Rolling time was 5–8 minutes; rolling temperature was 170±5°C.

Effect of formulation factors on the processing properties of polymer compound was assessed upon the processing by means of a laboratory twin-screw extruder.

Research examined the effect of various nanostabilizers on the technological and operational properties of the resulting composites since the process of oxidation takes place at every stage of the life of polyvinyl chloride material.

RESULTS

To prevent the perishing, and improve technological and operational characteristics of compositions during the processing, an important measure is introduction of nano-thermal stabilizers, whose addition in small quantities is comparable to the effect of stoichiometric ratio of the substances involved in the reaction.

A very large percentage of nanomodifiers for polymer are used to improve mechanical characteristics (strength and stiffness). Homopolymer polyvinylchloride is quite strong and light but not stiff enough. To impart improved properties, which is very important in the construction sector, cadmium was previously used in Europe and Russia. However, its use was gradually reduced since it was recognized as unsafe. According to well-known European analytical databases, cadmium was excluded from polyvinyl chloride modifiers throughout Europe by 2007.

A known fact is also replacement of lead nanostabilizers (75% reduction between 2000 and 2010; currently, they

are almost completely excluded). This is confirmed by the corresponding growth of calcium-based nanostabilizers used as an alternative.

Tin is also used as a stabilizer in Russia, Europe, but mainly in the USA. According to European manufacturers of PVC products, tin stabilizers have passed the stage of successful testing for environmental safety and are increasingly used along with calcium stabilizers.

A global trend in the PVC industry is introduction of calcium-zinc stabilizers, i.e. additives designed for obtaining safe products from polyvinylchloride. Such stabilizers are capable of performing the following functions:

- prevent degradation during extrusion;
- protect PVC profiles from deformation, discoloration and yellowing under the effect of ultraviolet light;
- simplify forming of PVC;
- ensure high-temperature performance.

In addition to environmental improvement, there are also technical grounds for the widespread use of calcium-zinc systems:

- these stabilizers are non-toxic;
- provide high thermal stability;
- provide weather resistance equal to or better than that of lead-containing systems;
- high protection against UV radiation.

The research involved the testing of calcium-zinc stabilizers designed for processing the unplasticized polymers of the Baeroran and Rhythmix brands. These stabilizers were introduced into the basic formula of nano-modified composite within the limits recommended by the manufacturers, i.e. in quantities of 3–6 parts by mass. The results are presented in Table 1.

Tests of calcium-zinc stabilizers in the basic formula show that the Baeroran brand provides comparatively better results. However, at the dosage of 6 parts by mass, the Rhythmix stabilizer provides the required level of thermal stability.

Calcium-zinc stabilizers are generally complex ones, i.e. contain small antioxidant additives, lubricants, and etc. in addition to calcium and zinc stearates. Despite this,

according to the results of investigation of melt flow index it is clear that the “lubricating” effect of these stabilizers both in Baeropan and Rhythmix is slightly expressed.

To optimize the rheological properties of nano-modified composite during extrusion, internal and external lubricants should be added to its composition. As the result of extrusion of PVC compositions, in addition to thermal effect, also mechanical loads have severe impact on the polymer material, under the influence of which several sequential-parallel reactions proceed in the polymer macromolecules:

- in the spots of the highest voltage concentration, the breaking of C-C bonds takes place, which leads to the decrease in the molecular weight of the polymer;
- elimination of hydrogen chloride molecule and polyene blocks;
- redistribution of the resulting radicals without a noticeable change in the viscosity-average molecular weight, i.e. “chemical flow”;
- cross-linking of macromolecules through increasing the viscosity, etc.

Addition of a stabilizer into the composite material, which modifies its chemical and mechanical properties, leads to extinction of destructive effect of physical loads on the material at forcing the polymer melt through the molding hole in the extruder. Reduction in internal friction as well as in heat, which is releasing in the process of mechanical work, proceeds as a result of introducing into the polymer composition the lubricants, which reduce the viscosity of the melt. As a result, the processing temperature goes down, destruction of polymer lessens, and distribution of the components included in the composition becomes easier [25, 26].

In order to facilitate the processing procedure of highly filled formulation of wood-polymer composites, investigations of nanoadditives of the ester type (glycerol monostearate, LoxiolG and Lubstab) concerning their melt flow index were carried out (Figure 1). Upon that, an increase in this parameter was found when using ester nanoadditives. Best result was obtained when using Lubstab brand

Table 1

Effect of stabilizers on the properties of nanomodified composite materials

Content of Ca–Zn stabilizer in the basic formula, parts by mass		Name of the test parameters		
		Thermal stability at 180°C, min	Melt flow index g/10 min (I = 21.6 kgf, T = 190°C)	Water sorption, %
Baeropan	2	56	0.56	6.1
	4	73	0.85	5.8
	6	85	1.1	5.2
Rhythmix	2	49	0.49	6.2
	4	67	0.64	6.0
	6	80	0.97	5.4

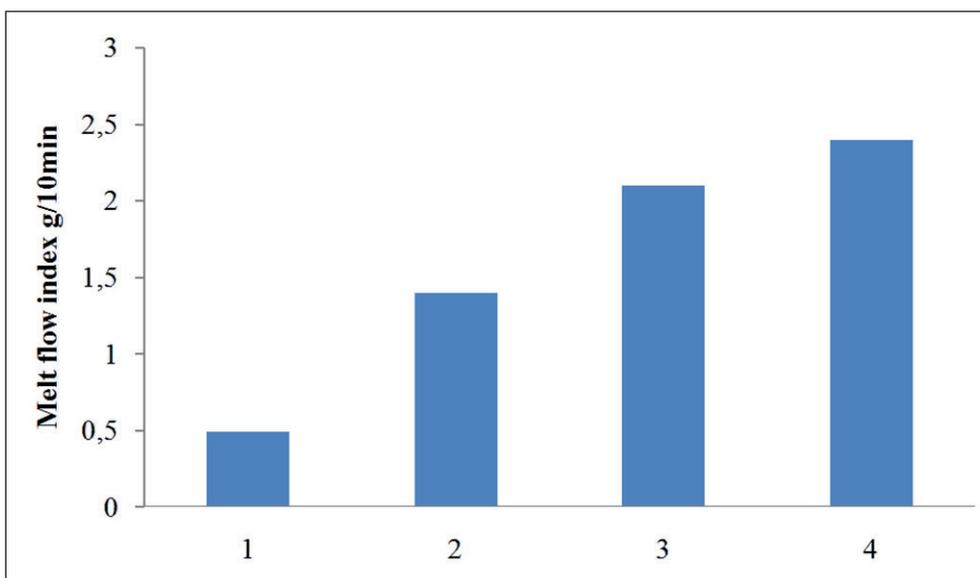


Fig. 1. Results of the experiment to evaluate the effect of nanoadditives on melt flow index: 1 – without nanoadditive; 2 – glycerol monostearate; 3 – LoxiolG; 4 – Lubstabs (at 190°C and 21.6 kg load)

lubricant, which makes it possible increasing the melt flow index from 0.49 to 2.4 g/10 min.

Studies carried out to determine the optimal dosage of Lubstabs lubricant show that at its dosage in an amount of 2 parts by mass (Figure 2), the melt flow is 3.3 g/10 min. With the increase in its content, melt flow index of flexible PVC compound increases, which indicates an increase in the mobility of supermolecular structures in the polymer

melt. A further increase in the dosage of nanoadditives is impractical, because it may adversely affect the physical and mechanical characteristics of the resulting nanobuilding materials.

The addition of nanoadditives of this type to the wood-polymer composites allows achieving an increase in the productivity of processing equipment, in particular, of the laboratory extruder. In addition, the improve-

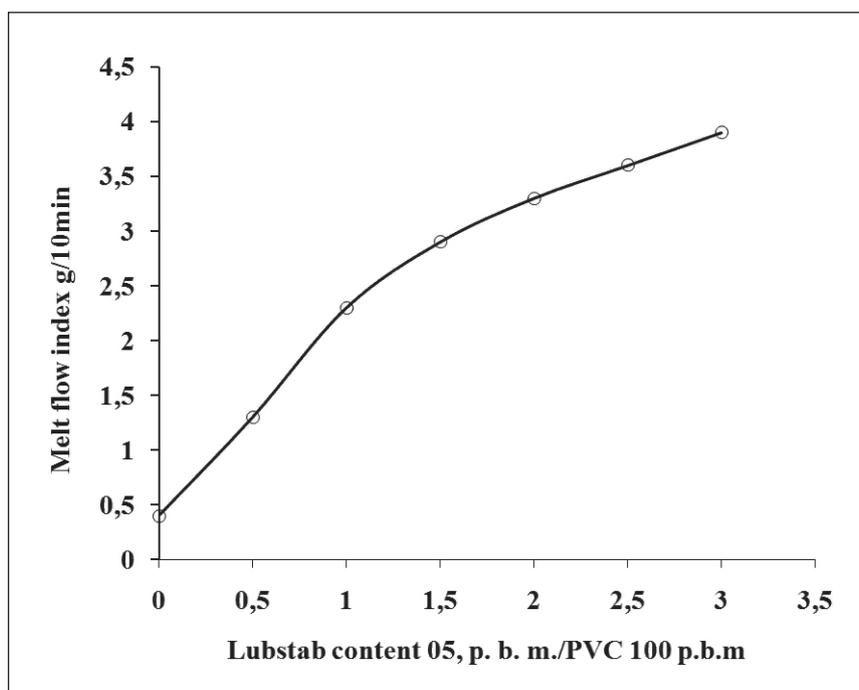


Fig. 2. Dependence of the melt flow index on the amount of Lubstabs introduced

ment of the performance of composites is influenced by the uniform distribution of woodflour particles in the polymer volume as well as the enhancement of their interaction.

Nanoadditives based on titanates contribute to increase the strength of polymers and enhance the bond between organic polymers and inorganic fillers.

The possibility of increase in adhesive interaction of polymer with woodflour through introducing the organotitanate nanoadditive into the composition is evaluated.

It has been established that addition of 1% of organotitanate to the composition leads to increase in the strength of composite, and a further increase in its dosage to 2% does not affect the physical and mechanical properties of the composite (Table 2).

Nanoadditives under investigation have a great impact on the water absorption index. In particular, with the introduction of Lubstab, a decrease in the value of this index is observed. Addition of organotitanate reduces water absorption. This is explained by the more uniform distribution of woodflour in the polymer composition under the effect of ester lubricant, as well as by increase in the adhesive interaction between the polymer and filler due to the effect of organotitanate.

To give maximum exterior resistance to the products, the effect of the UV stabilizer Chimassorb (BASF Germany) and antioxidant Agidol, which is a mixture of penterythritol tetrakis [3- [3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl] propionate and tri(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite was studied.

Investigation of the UV stabilizers' effect on the light-resistance of composite materials was carried out in the Solarbox desktop camera 1500E, which has luminous flux intensity of 765 W/m²; testing time lasted for 300 hours. The test results are shown in Table 3 and Table 4.

DISCUSSION

Effect of various modifiers on the technological and operational properties of nano-modified composite materials has been studied. As a result of the research, components are selected, which ensure high efficiency of stabilizing system against thermal decomposition, increase melt flow of polymer, reduce water absorption and give sufficiently high outdoor stability to the materials, which is particularly true when used in construction.

Thus, it was established in the course of investigations that Rhythmix stabilizer and Lubstab lubricant provide

Table 2

Research results of assessing the effect of organotitanate on the mechanical properties of composite

No.	Name of the index	Content of organotitanate, %		
		0	1	2
1	Tensile strength, MPa	28	34	35
2	Elongation at break %	33	57	59

Table 3

Result of investigation of the UV irradiation effect on the appearance of nano-modified composite

No.	Irradiation time, h							
	0	25	50	100	150	200	250	300
1*								
2*								
3*								

* sample 1 – without UV stabilizer; sample 2 – with the addition of Chimassorb; sample 3 – with the addition of Chimassorb and Agidol

Table 4

Test results on the change in color of nanocomposites under the influence of UV irradiation in CIELab coordinates

No.	Color data	Time of exposure, h						
		25	50	100	150	200	250	300
1	L	50.65	47.74	46.28	40.62	36.63	34.25	33.88
	a	12.46	12.43	11.65	11.31	10.26	8.50	8.63
	b	27.11	25.21	23.21	18.97	14.34	10.23	10.06
	ΔL	-1.94	-4.85	-6.31	-11.97	-15.96	-18.34	-18.71
	Δa	0.13	0.11	-0.67	-1.01	-2.06	-3.83	-3.69
	Δb	0.03	-1.88	-3.87	-8.11	-12.74	-16.85	-17.02
	ΔE	1.95	5.20	7.43	14.50	20.52	25.20	25.57
2	L	63.78	56.35	56.45	54.54	52.64	49.04	47.51
	a	7.28	8.75	9.02	10.25	11.33	12.60	12.93
	b	26.17	24.93	26.19	27.71	29.21	28.03	27.14
	ΔL	5.55	-1.88	-1.78	-3.69	-5.60	-9.19	-10.72
	Δa	-1.17	0.30	0.57	1.80	2.88	4.15	4.49
	Δb	4.23	2.99	4.26	5.78	7.28	6.09	5.21
	ΔE	7.08	3.55	4.65	7.09	9.62	11.78	12.74
3	L	56.97	56.69	54.33	52.33	48.13	46.53	44.67
	a	8.45	9.09	9.73	11.05	12.04	12.82	13.11
	b	24.33	26.29	26.32	27.86	26.81	26.20	24.93
	ΔL	1.24	0.95	-1.40	-3.40	-7.60	-9.21	-11.06
	Δa	-0.10	0.54	1.18	2.50	3.49	4.26	4.56
	Δb	3.03	5.00	5.02	6.56	5.52	4.90	3.63
	ΔE	3.28	5.12	5.35	7.80	10.02	11.27	12.05

a required level of thermal stability and melt flow of the composite.

Based on the obtained decoloration values ΔE calculated on the color separation of composite materials during the sample exposure, it was found that the composition containing UV stabilizer Chimassorb is more resistant to decoloration under the influence of UV irradiation. In this case, the total color difference (chromatic) decreases from 25.57 to 12.74.

Combined use of Chimassorb and Agidol provides the composite higher color retention, and therefore increases the environmental resistance of material.

CONCLUSION

This research shows a possibility of combining utilization of various nanoadditives. To achieve this goal, components were selected, which ensure high efficiency of the stabilizing system against heat degradation of polymer, increase its melt flow, reduce water absorption and give composite materials high outdoor stability.

Components selected during the investigation have a prospect of being used on industrial scale in the process of manufacturing composite materials based on plant resources.

This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «PRIORITY 2030» (National Project «Science and University»)

REFERENCES

1. Abdrakhmanova L.A., Khantimirov A.G., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer nanomodified polyvinyl chloride building composites. *Bulletin of MGSU*. 2018; 13(4) (115): 426-434.
2. Ekimenko A.N. Prospects for the use of organosilanes in thermoplastic composites with plant fillers. *Plastics*. 2018; 1-2: 28-33.
3. Burmakina E.V. Main characteristics and trends in the development of the market for wood-polymer composites. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V.G. Shukhova*. 2019; 2682-2686.
4. Fayzullin I.Z., Musin I.N., Wolfson S.I. Features of the production of products from wood-polymer composite. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(3): 130-134.
5. Faizullin I.Z., Musin I.N., Wolfson S.I. Influence of filler particle size on the properties of wood-polymer composites. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013; 16(5):106-109.
6. Musin I.N., Faizullin I.Z., Wolfson S.I. The influence of additives on the properties of wood-polymer composites. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012; 15(24): 97-99.
7. Cai Hong Zhen, Yang Keyan, Yi Weiming. Effects of calcium carbonate preparation and mechanical properties of wood plastic composite. *Int J Agric & Biol Eng. Open Accessat*. <https://www.ijabe.org>. 2017; 10(1): 184-190.
8. Klyosov A. A. Wood-polymer composites. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies. 2010; 736.
9. Safin R.R., Khasanshin R.R., Danilova R.V., Khazieva D.R. Study of the properties of wood-polymer composites based on thermally modified filler. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013; 16(24): 53-55.
10. Editor Vijay Kumar Thakur. *Green composites from natural resources*. CRC Press; 2013; 419.
11. Solovyov P.V., Knyazkov E.S. Review of technology for producing wood-polymer composites. *February Readings*. 2017; 270-273.
12. Girevaya Kh.Ya., Shubina N.I. Recycling of polymer waste by obtaining wood-polymer composite material and studying its properties. *Theory and technology of metallurgical production*. 2012; 12: 156-161.
13. Burmakina E.V. Main characteristics and trends in the development of the market for wood-polymer composites. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V.G. Shukhova*. 2019; 2682-2686.
14. Nesterova A.V., Chernova A.O. Wood-polymer composites made by extrusion. *Youth and scientific and technical progress*. 2020; 286-290.
15. Valeev I.A. Study of the influence of filler and binder on the physical and mechanical properties of wood-polymer composite. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014; 17(10): 40-42.
16. Yurchenko V.V. Analysis of modifying additives used in thermoplastic wood-polymer composites. *Collection of scientific works of DonIZT*. 2012. 30: 135-140.
17. Minsker K.S., Fedoseeva G.T. *Destruction and stabilization of polyvinyl chloride*. Moscow: Chemistry; 1972.
18. Yakubovsky S.F., Khoroshko S.I. Properties of wood-polymer composites obtained from powdered copolymer and sawdust. *Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*. 2014; 3: 106-109.
19. Gonzalez. J. Pastor J. De Saja. F. de la. Monitoring the UV degradation of PVC window frame by microhardness analysis. *J. Appl. Polym. Sci*. 38(1989): 1879-1882.
20. Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Mukhin N.M. Preparation and study of the properties of wood-polymer composites with fillers from plant waste. *Bulletin of the Moscow State Forest University. Forest Bulletin*. 2016; 20(3). 101-105.
21. Sheryshev M.A., Tikhonov N.N. Production of profile products from PVC. St. Petersburg: Scientific principles and technologies. 2012; 614.
22. Minsker K.S. Classification of lubricants for PVC. K.S. Minsker, L.I. Karpacheva, T.B. Zavarova, L.N. Malyshchev. *Plastic masses*. 1977; 1: 29-31.
23. Milov V.I. Relationship between the plasticizing effect of lubricants and technological parameters of extrusion of PVC-based compositions. V.B. Mozhukhin, V.I. Maksimenko. *Plastic masses*. 1989; 12: 52-53.
24. Marsakova E.V. Modern wood-polymer composites. In the collection: Scientific community of students. Interdisciplinary research. Collection of articles based on the materials of the LXX student international scientific and practical conference. 2019; 17-27.
25. Lisitsky V.V. Mechanochemical destruction of PVC. V.V. Lisitsky, A.P. Savelyev, V.I. Manushkin, K.S. Minsker. *Plastic masses*. 1981; 3: 24-26.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Liliya R. Asfandiyarova – Cand Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia, asfand_lilya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-201X>

Guzel V. Khakimova – senior lecturer, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia, yunusovagv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0047-2676>

Inna V. Ovsyannikova – senior lecturer, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia, inna.ovsyannikova.80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5894-5531>

Anna Y. Matveeva – laboratory technician, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia, m-anna2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3142-1075>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Liliya R. Asfandiyarova – idea, scientific leadership; research concept; writing the text.

Guzel V. Khakimova – editing the text of the paper; communicating with the publisher.

Inna V. Ovsyannikova – collection and processing of material; final conclusions.

Anna Y. Matveeva – preparation of the paper in accordance with the requirements.

The authors declare no conflict of interest.

This paper was submitted for publication 10.10.2023; approved after review 07.11.2023; accepted for publication 09.11.2023.

Научная статья

УДК 624:6-022.532

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>

CC BY 4.0

Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы

Лилия Рафиковна Асфандиярова* , Гузель Венеровна Хакимова , Инна Вячеславовна Овсянникова ,
Анна Юрьевна Матвеева 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Преимуществами наномодифицированных композитов строительного назначения на основе поливинилхлорида (ПВХ) являются повышенные по сравнению с другими прочностные показатели [1]. Композитные наноматериалы на основе растительного сырья являются универсальным материалом, свойства которого можно модифицировать добавками и технологией переработки для получения очень большой номенклатуры изделий в различных областях применения, в частности, для строительства, получения декоративной, уличной и садовой мебели, сайдинга, штакетников, тары и поддонов и многого другого. Исследование направлено на изучение влияния различных добавок на технологические и эксплуатационные свойства получаемого композита. Наномодифицированные композиты на основе ПВХ превосходят полиолефиновые композиты по жесткости и прочности, имеют высокую светостойкость и устойчивость ко многим химическим веществам и сравнительную дешевизну исходного сырья [2]. **Методы и материалы.** Целью данного исследования является определение компонентного состава композиционных материалов, обеспечивающих высокую эффективность стабилизирующей системы против термодеструкции, повышающие текучесть расплава полимера, снижающие водопоглощение и придающие достаточно высокую атмосферостойкость, в связи с чем изделия из него могут с успехом применяться в области строительства. **Результаты.** Результаты исследований показали, что использование наностабилизаторов в технологии получения строительных материалов позволяют обеспечить сохранность и долговечность полимерных композитов, а также имеют перспективу использования в промышленных масштабах. **Заключение.** Проведенное исследование по совместному использованию наностабилизаторов придает строительному композиту более высокую стабильность цвета и, следовательно, повышает устойчивость материала к внешним воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наностабилизаторы, древесно-полимерный композиционный материал, строительство.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В., Овсянникова И.В., Матвеева А.Ю. Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15, № 6. С. 543–551. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>. – EDN: UDJUBI.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы спрос на наномодифицированные композиционные материалы на основе растительного сырья на российском рынке строительных материалов стремительно вырос, что связано с рекордными темпами развития строительного сектора, особенно частного домостроения, и многократным ростом цен на древесину, что заставило покупателей искать более выгодные с финансовой и коммерческой точки зрения альтернативы.

Наномодифицированные древесно-полимерные материалы — это сверхновые и актуальные стройма-

териалы, включающие термопласты, наполненные древесной массой, которые совмещают в себе полезные качества как полимеров, так и растительного сырья, при этом в роли пластмасс применяются полиэтилен, полипропилен и поливинилхлорид. Соотношение древесной муки и полимера в компаунде может модифицировать его физико-механические характеристики.

Полимерные композиционные материалы на основе поливинилхлорида (ПВХ) в настоящее время широко используются в различных областях экономики, основной областью их применения являются строительство, производство тары и упаковки, ка-

бельная промышленность ввиду низкой стоимости, больших запасов и нетоксичности, особое внимание привлекает использование в рецептуре композитов древесной муки.

Лидерами производства и потребления изделий из древесно-наполненных ПВХ являются Китай, Япония и др. В России данный материал недостаточно широко используется, однако перспективность его не подвергается сомнению. Мощными стимулами для развития данного рынка являются наличие лесных ресурсов и постоянно растущая потребность в высококачественных строительных и конструкционных материалах.

В России наблюдается большой интерес к рынку наномодифицированных строительных композитных материалов. Количество производителей в России растет с каждым годом: если в 2010 году в этом секторе работало всего четыре компании, то в 2015 году уже более шестидесяти производителей (лидируют компании МультиПласт – 23%, Техно-Полимер 11%).

Основными европейскими производителями композитов являются Германия, Франция и Финляндия. Важнейшими причинами, ограничивающими рост отечественного рынка, считаются несформированная потребность, отсутствие однородности продукции, отсутствие норм и технической документации [3].

Наномодифицированные древесно-полимерные композиты являются современными строительными материалами с технологией смешивания древесной муки, различных полимеров и других компонентов. Главным способом получения наномодифицированных полимерных композитов является экструзия, при этом используется двухшнековый экструдер для полной гомогенизации смеси, в результате чего получается высококачественный формованный продукт [4–6].

Данные материалы более устойчивы к атмосферным воздействиям и гораздо более долговечны, чем древесные материалы, что важно для эксплуатации в наших климатических условиях.

По сравнению с продукцией из чистого пиломатериала они обладают большей устойчивостью к влиянию воды и микроорганизмов, стойкостью к действиям атмосферы. Композиционные материалы считаются многофункциональными изделиями, их характеристики быстро видоизменяются, что в конечном итоге позволяет производить широкий перечень продукции с разными механическими и эстетическими свойствами [7–8].

В связи с тем, что древесная мука является основным компонентом композита, в последние годы широко поощряется разработка и применение изделий из древесно-наполненного пластика для облегчения

переработки отходов пластмасс и сокращения потребления лесных ресурсов [9].

В качестве полимерной матрицы в составах наномодифицированных композиционных материалов в основном применяется полиэтилен и полипропилен, однако композиты на основе ПВХ превосходят полиолефиновые композиты по жесткости и прочности, имеют высокую светостойкость и устойчивость к химическим веществам и сравнительную дешевизну исходного сырья, при этом они характеризуются недостаточной термостойкостью, ударной вязкостью и гидрофобностью [10–11].

Поэтому древесно-полимерные композиты, основу которых составляет ПВХ, являются одним из наиболее перспективных современных материалов с широкими эксплуатационными характеристиками, рентабельностью производства, относительной легкостью переработки [12–16].

На сегодняшний день экструзия считается самой известной технологией для получения продукции из композиционных термопластичных полимеров, большое количество зарубежных компаний используют эту технологию для производства профилей и трубчатых компонентов и др.

Древесное сырье, содержащее целлюлозу, имеет пористую структуру и при воздействии высоких температур и давлений подвергается окислению, а также является материалом с абразивным износом. В связи с этим часто возникает ряд проблем, в частности, адсорбция газообразных веществ опилками и выделение их в экструдере, риск возникновения возгораний и взрыва из-за образующейся газовой смеси, выделение смолистых веществ из древесины хвойных пород при переработке опилок.

Эти недостатки могут быть устранены в случае использования наномодифицированных добавок, входящих в рецептуру композитов [17], которые состоят из следующих компонентов:

- внешние и внутренние смазочные материалы, предотвращающие прилипание к экструзионной головке, повышающие текучесть и снижающие вязкость;
- связующее и диспергирующее вещество – для улучшения дисперсии полимерной матрицы и механических свойств, таких как прочность на растяжение, прочность на изгиб и ударопрочность;
- антипирены, повышающие огнестойкость пластмасс; вспенивающие агенты, уменьшающие вес древесно-полимерных композитов и облегчающие при строительстве забивание гвоздей, сверление, крепление, завинчивание и резку;
- антиоксиданты, традиционно используемые для предотвращения старения материала со временем в процессе его использования;

- модификаторы ударопрочности, улучшающие устойчивость к атмосферным воздействиям при наружном строительстве;
- фунгициды, защищающие строительные изделия от микроорганизмов и плесени, а также ультрафиолетовые стабилизаторы (УФ-стабилизаторы);
- пигменты, защищающие изделия от воздействия световых лучей и предотвращающие их выцветание.

В целом, наностабилизаторы можно разделить на две группы: функциональные и технологические. Функциональные определяют свойства композита, технологические оказывают влияние в процессе высокотемпературной переработки полимерной композиции. Основными группами наномодификаторов, обычно применяющимися в производстве материалов на основе ПВХ, являются стабилизаторы, модификаторы ударной прочности и перерабатываемости, смазки.

Содержание наномодификаторов составляет около 1–5% от массы смеси, но именно они оказывают существенное воздействие на характеристики конечного строительного изделия (прочность, внешний вид, долговечность), поэтому исследование влияния различных наномодификаторов на эксплуатационные свойства получаемых строительных материалов является на сегодня актуальной задачей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Цель исследований заключается в определении эффективных наномодифицирующих компонентов, в частности наностабилизаторов, обеспечивающих сохранность полимеров при переработке и при эксплуатации, так как разрушение полимеров приводит к изменениям таких показателей, как вязкость, цвет, прочность, и ухудшению характеристик физико-механического характера.

В данную группу входят антиокислители, температурные стабилизаторы и светостабилизаторы, обеспечивающие целостность полимеров в процессах использования и переработки. Использование наномодифицированных антиокислителей препятствуют окислению в ходе технологического процесса и при эксплуатации, к ним относятся затрудненные фенолы, алкил/арил фосфиты и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к стабилизирующим добавкам, являются удаление лабильных хлоридных групп, поглощение хлористого водорода, повышение показателя влагостойкости, устойчивости к процессу окислению, а также низкая токсичность и низкая стоимость.

На сегодняшний день нанотермостабилизаторы, в составе которых содержатся такие токсичные вещества, как стеараты кадмия, свинца, бария, стро-

го ограничены, в связи с чем на рынке повышается доля нетоксичных стабилизаторов, таких как стеарат кальция, стеарат цинка [18–20].

Помимо перечисленных, при производстве композитов используются противоударные наномодификаторы, которые влияют на увеличение ударной прочности изделий с приданием возможности выдерживания внезапной нагрузки без разрушения. Такие наномодификаторы делятся на следующие: наномодификаторы, имеющие структуру «ядро-оболочка» (MBS- (метакрилат-бутадиенстирол), AIM (акриловые наномодификаторы ударной вязкости) и наномодификаторы ABS (акрилонитрил-бутадиенстирол) и наномодификаторы с полусовместимой сетевой структурой (CPE – хлорированный полиэтилен, EVA – этилен-винилацетат, NBR (акрилонитрил-бутадиен-каучук) [21].

Процессинговыми добавками или наномодификаторами перерабатываемости, позволяющими упростить процесс переработки расплава, являются совместимые с поливинилхлоридом полимеры, в том числе ослабляющие ограничения движения полимерной цепи и сегментов. Они необходимы для того, чтобы способствовать распаду частиц полимера, обеспечивать гомогенность расплава, быстрое желирование и необходимую степень пластикации.

В качестве их может быть использован широкий ряд сополимеров метилметакрилата (ММА) со стиролом, акрилата, метакрилата и м-виниллактама, ММА и глицидилметакрилата, ММА и акрилакрилатов и др. [22].

Перечисленные нанодобавки обеспечивают процессы снижения трения в процессе переработки, а по механизму действия делятся на внутренние, внешние и смешанного действия, в частности, первые термодинамически совместимы с полимером, способствуют уменьшению силы межмолекулярного взаимодействия и, следовательно, вязкости полимера. Смазки внешнего действия облегчают процесс переработки полимера, переводя режим со сдвигового в режим «пробкового» скольжения, следует также отметить, что вследствие недостаточной совместимости с полимером они в процессе переработки выделяются на границу раздела «расплав – металл» и вызывают уменьшение адгезии полимера к металлическим поверхностям перерабатывающего оборудования [23].

Необходимость использования наномодификаторов определяют исходя из требований, предъявляемых к конечным изделиям в зависимости от условий их эксплуатации и к технологичности в процессах переработки, зависящим от конструктивных особенностей экструзионной линии.

Композиты на основе растительных компонентов находят все более широкое коммерческое применение при строительстве, важным требованием к экс-

плуатационным характеристикам этого материала является долговечность на открытом воздухе.

Под действием ультрафиолетового облучения, а также в присутствии кислорода и влаги полимер подвергается очень быстрому дегидрохлорированию и перекисному окислению с образованием полиенов, что приводит к резкому изменению механических свойств полимера [24].

Исследование влияния наностабилизаторов на технологические и эксплуатационные свойства композиционных материалов проводили при массовом соотношении ПВХ : древесная мука – 1:1.

Древесно-полимерную композицию получали смешением компонентов в высокоскоростном смесителе при нагревании до 120°C, после чего полученную полимерную массу охлаждали до температуры 40–60°C и переплавляли на лабораторном экструдере с получением агломерата. Образцы для испытаний (гранулы) получали из агломерата методом вальцевания. Время вальцевания 5–8 мин, температура вальцевания 170±5°C.

Влияние рецептурных факторов на технологические свойства полимерной композиции оценивали при переработке на лабораторном двухшнековом экструдере.

В ходе исследования изучено влияние различных наностабилизаторов на технологические и эксплуатационные свойства получаемых композитов, ведь окисление происходит на каждой стадии существования поливинилхлоридного материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для недопущения разрушения, улучшения технологических и эксплуатационных характеристик в процессах переработки композиций важным компонентом является введение нанотермостабилизатора, добавление которого в небольших количествах сравнимо с влиянием стехиометрического отношения веществ, принимающих участие в реакции.

Также очень большой процент наномодификаторов для полимера используется в целях улучшения механических характеристик (твердости и жесткости). Гомополимер поливинилхлорид является достаточно прочным, но легким и недостаточно жестким. Для придания улучшенных свойств, что очень актуально в строительной сфере, раньше в Европе и России в обязательном порядке использовали кадмий, однако постепенно его использование сокращалось, так как он был признан небезопасными. Так, согласно известным европейским аналитическим базам данных, он был исключен из модификаторов поливинилхлорида по всей Европе к 2007 году.

Известным фактом является также замена свинцовых наностабилизаторов (сокращение на 75%

в период с 2000 по 2010 год, в настоящее время они практически полностью исключены), что подтверждено соответствующим ростом наностабилизаторов на основе кальция, используемых как альтернатива.

В виде стабилизаторов в России, Европе, но, главным образом, в США используется и олово. По данным европейских производителей изделий из ПВХ, оловянные стабилизаторы находят все более широкое применение наряду с кальциевыми и прошли стадию успешных испытаний на экологическую безопасность.

Мировой тенденцией развития индустрии ПВХ является внедрение кальцийцинковых стабилизаторов-присадок, предназначенных для производства безопасных изделий из поливинилхлорида. Такие стабилизаторы способны выполнять следующие функции:

- предотвращать деградацию во время экструзии;
- защищать ПВХ-профили от деформации, обесцвечивания и пожелтения под воздействием ультрафиолета;
- облегчить формирование ПВХ;
- обеспечить стойкость к высоким температурам.

Кроме улучшения экологии, существуют и технические основания для широкого применения кальций-цинковых систем:

- эти стабилизаторы нетоксичны;
- обеспечивают высокую термостабильность;
- обеспечивают погодостойкость, равную или лучшую, чем у свинецсодержащих систем;
- высокая защита от УФ-излучения.

В работе были проведены испытания кальций-цинковых стабилизаторов, предназначенных для переработки непластифицированных полимеров марок: Ваегоран, Ритмикс. В состав базовой рецептуры наномодифицированного композита данные стабилизаторы вводили в пределах, рекомендованных производителями, в количествах 3–6 массовых частей. Результаты представлены в табл. 1.

Испытания кальций-цинковых стабилизаторов в базовой рецептуре показывают, что марка Ваегоран показывает сравнительно лучшие результаты, однако при дозировке 6 массовых частей стабилизатор Ритмикс обеспечивает необходимый уровень термостабильности.

Кальций-цинковые стабилизаторы, как правило, являются комплексными, т.е. включают в состав, кроме стеаратов кальция и цинка, малые добавки-антиоксиданты, смазки и т.д. Несмотря на это, по результатам исследований показателя текучести расплава видно, что «смазывающий» эффект стабилизаторов, как «Ваегоран», так и Ритмикс выражены слабо.

Для оптимизации реологических свойств наномодифицированного композита в процессе экструзии

Таблица 1

Влияние стабилизаторов на свойства наномодифицированных композиционных материалов

Содержание Са–Zn стабилизатора в базовой рецептуре, масс.ч	Наименование исследуемого показателя		
	Термостабильность при 180°С, мин	ПТР, г/10 мин. (P = 21,6 кгс, T = 190°С)	Водопоглощение, %
Ваеропан	2	56	0,56
	4	73	0,85
	6	85	1,1
Ритмикс	2	49	0,49
	4	67	0,64
	6	80	0,97

зии требуется добавление в его состав внутренних и внешних смазок. В результате экструзии ПВХ-композиций, помимо термического, серьезное воздействие на полимерный материал оказывают нагрузки механической природы, под влиянием которых в макромолекулах полимера протекают несколько последовательно-параллельных реакций:

- в местах наибольшей концентрации напряжения разрыв С–С связей, который приводит к уменьшению молекулярной массы полимера;
- отщепление молекулы хлористого водорода и блоков полиенов,
- перераспределение образующихся радикалов без заметного изменения средневязкостной молекулярной массы «химическое течение»;
- сшивка макромолекул с увеличением вязкости и т.д.

Добавление в состав композиционного материала стабилизатора, модифицирующего химические и механические свойства, приводит к ослаблению разрушающего действия физических нагрузок на ма-

териал при продавливании полимерного расплава через формующее отверстие в экструдере. Уменьшение внутреннего трения и количества теплоты, выделяющейся в процессе механической работы, происходит в результате введения в полимерную композицию смазок, снижающих вязкость расплава. В результате этого снижается температурный режим процесса, уменьшается деструкция полимера и облегчается распределение входящих в состав композиции компонентов [25, 26].

В целях облегчения процесса переработки высоконаполненной рецептуры древесно-полимерных композитов были проведены исследования нанодобавок сложноэфирного типа – моностеарат глицерина, LoxiolG и Лубстаб на их показатель текучести расплава (ПТР) (рис. 1).

Установлено повышение данного показателя при использовании сложноэфирных нанодобавок, при этом лучший результат получен при использовании смазки марки Лубстаб, позволяющий повысить показатель текучести расплава с 0,49 до 2,4 г/10 мин.

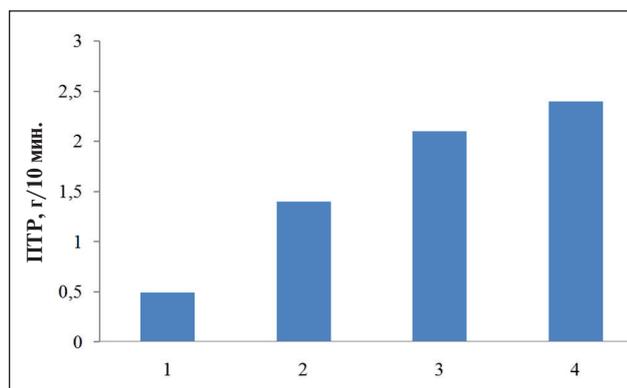


Рис. 1. Результаты эксперимента по оценке влияния нанодобавок на показатель текучести расплава (при температуре 190°С и нагрузке 21,6 кг): 1 – отсутствие нанодобавки; 2 – моностеарат глицерина; 3 – LoxiolG; 4 – Лубстаб

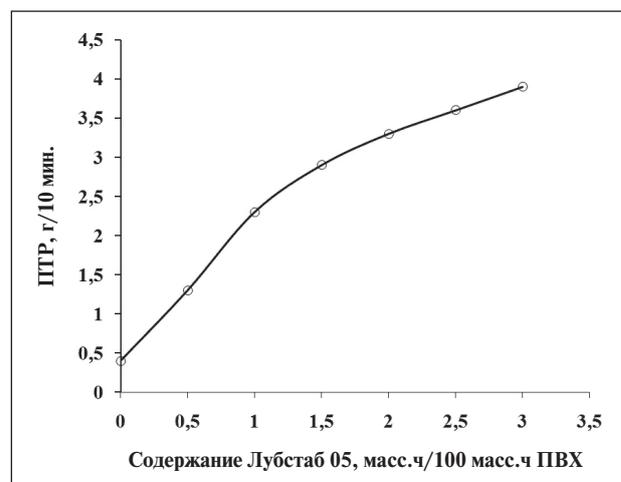


Рис. 2. Зависимость показателя текучести расплава от количества вводимой нанодобавки Лубстаб

Исследования, проведенные для определения оптимальной дозировки Лубстаб, показывают, что при его дозировке в количестве 2 масс. ч. (рис. 2) текучесть расплава составляет 3,3 г/10 мин., а с увеличением его содержания происходит повышение показателя текучести расплава пластика, что свидетельствует о повышении подвижности надмолекулярных структур в расплаве полимера. Дальнейшее увеличение дозировки нанодобавки нецелесообразно, так как может отрицательно повлиять на физико-механические характеристики готовых наностроительных материалов.

Добавление в состав древесно-полимерных композитов нанодобавок такого типа позволяет достичь увеличения производительности перерабатывающего оборудования, в частности лабораторного экструдера. Кроме этого, на улучшение эксплуатационных характеристик композитов влияет равномерное распределение частиц древесной муки в объеме полимера и усиление их взаимодействия.

Нанодобавки на основе титанатов способствуют повышению прочности полимеров, усиливая связь между органическими полимерами и неорганическими наполнителями.

Нами проведена оценка возможности повышения адгезионного взаимодействия полимера с древесной мукой введением в композицию нанодобавки – органотитаната.

Установлено, что добавка в композицию 1% органотитаната приводит к повышению прочности композита, а дальнейшее увеличение его дозировки до 2% не влияет на физико-механические свойства композита (табл. 2).

Исследуемые нанодобавки оказывают существенное влияние на важный показатель водопоглощения, в частности, при введении Лубстаб наблюдается снижение значения этого показателя. Добавление органотитаната влияет на уменьшение водопоглощения, что объясняется более равномерным распределением древесной муки в составе полимерной композиции под влиянием сложноэфирной смазки, а также усилением адгезионного взаимодействия между полимером и наполнителем, обусловленного влиянием органотитаната.

Для придания максимальной атмосферостойкости изделиям нами было изучено влияние УФ-стабилизатора марки «Chimassorb» (BASF Германия) и антиоксиданта марки Агидол, представляющего

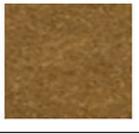
Таблица 2

Результаты исследований по оценке влияния органотитаната на механические свойства композита

№ пп	Наименование показателя	Содержание органотитаната, %		
		0	1	2
1	Прочность при разрыве, МПа	28	34	35
2	Относительное удлинение при разрыве %	33	57	59

Таблица 3

Результаты исследования по влиянию УФ-облучения на внешний вид наномодифицированного композита

№	Время облучения, ч							
	0	25	50	100	150	200	250	300
1*								
2*								
3*								

* образец № 1 – без использования УФ-стабилизатора; образец № 2 – с добавлением Chimassorb; образец № 3 – с добавлением Chimassorb и Агидол

собой смесь пентаэритритолтетраакс [3-[3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенил] пропионата и три (2,4-ди-третбутилфенил)фосфита.

Исследование по изучению влияния УФ-стабилизаторов на стойкость композиционных материалов к изменению цвета проводили в настольной камере «Solarbox» 1500E с интенсивностью светового потока 765 Вт/м², время испытания составило 300 часов. Результаты испытаний приведены в данных табл. 3, 4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено влияние различных модификаторов на технологические и эксплуатационные свойства наномодифицированных композиционных материалов. В результате проведенных исследований подобраны компоненты, обеспечивающие высокую эффективность стабилизирующей системы против термодеструкции, повышающие текучесть расплава

полимера, снижающие водопоглощение и придающие достаточно высокую атмосферостойчивость материалам, что особенно актуально при применении их в строительстве.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что стабилизатор Ритмикс и смазка Лубстаб обеспечивают необходимый уровень термостабильности и текучести расплава композита.

Исходя из полученных значений изменения цвета ΔE , рассчитанного по изменению цвета композиционных материалов в процессе экспозиции образцов, композиция, содержащая «Chimassorb» является более устойчивой к изменению цвета под воздействием УФ-облучения – полное цветовое отличие снижается с 25,57 до 12,74.

Совместное использование «Chimassorb» и Агидол придает композиту более высокую стабильность цвета и, следовательно, повышает устойчивость материала к внешним воздействиям.

Таблица 4

Результаты испытаний по изменению цвета нанокompозитов под влиянием УФ-облучения в координатах CIE Lab

№	Координаты цвета	Время облучения, ч						
		25	50	100	150	200	250	300
1	L	50,65	47,74	46,28	40,62	36,63	34,25	33,88
	a	12,46	12,43	11,65	11,31	10,26	8,50	8,63
	b	27,11	25,21	23,21	18,97	14,34	10,23	10,06
	ΔL	-1,94	-4,85	-6,31	-11,97	-15,96	-18,34	-18,71
	Δa	0,13	0,11	-0,67	-1,01	-2,06	-3,83	-3,69
	Δb	0,03	-1,88	-3,87	-8,11	-12,74	-16,85	-17,02
	ΔE	1,95	5,20	7,43	14,50	20,52	25,20	25,57
2	L	63,78	56,35	56,45	54,54	52,64	49,04	47,51
	a	7,28	8,75	9,02	10,25	11,33	12,60	12,93
	b	26,17	24,93	26,19	27,71	29,21	28,03	27,14
	ΔL	5,55	-1,88	-1,78	-3,69	-5,60	-9,19	-10,72
	Δa	-1,17	0,30	0,57	1,80	2,88	4,15	4,49
	Δb	4,23	2,99	4,26	5,78	7,28	6,09	5,21
	ΔE	7,08	3,55	4,65	7,09	9,62	11,78	12,74
3	L	56,97	56,69	54,33	52,33	48,13	46,53	44,67
	a	8,45	9,09	9,73	11,05	12,04	12,82	13,11
	b	24,33	26,29	26,32	27,86	26,81	26,20	24,93
	ΔL	1,24	0,95	-1,40	-3,40	-7,60	-9,21	-11,06
	Δa	-0,10	0,54	1,18	2,50	3,49	4,26	4,56
	Δb	3,03	5,00	5,02	6,56	5,52	4,90	3,63
	ΔE	3,28	5,12	5,35	7,80	10,02	11,27	12,05

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе подобраны компоненты, обеспечивающие высокую эффективность стабилизирующей системы против термодеструкции полимера, повышающие текучесть расплава полимера, снижаю-

щие водопоглощение и придающие композиционным материалам высокую атмосферостойчивость.

Подобранные в ходе исследования компоненты имеют перспективу использования в промышленных масштабах при производстве материалов на основе композиционных материалов на растительной основе.

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // Вестник МГСУ. 2018. 13(4)(115). 426–434.
2. Екименко А.Н. Перспективы использования органосилонов в термопластичных композитах с растительным наполнителем // Пластические массы. 2018. 1-2. 28–33.
3. Бурмакина Е.В., Основные характеристики и тенденции развития рынка древесно-полимерных композитов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. 2682–2686.
4. Файзуллин И.З., Мусин И.Н., Вольфсон С.И. Особенности производства изделий из древесно-полимерного композита // Вестник технологического университета. 2015. 18(3). 130–134.
5. Файзуллин И.З., Мусин И.Н., Вольфсон С.И. Влияние размера частиц наполнителя на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 5. С. 106–109.
6. Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Влияние добавок на свойства древесно – полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 24. С. 97–99.
7. Cai Hong Zhen, Yang Keyan, Yi Weiming. Effects of calcium carbonate preparation and mechanical properties of wood plastic composite. Int J Agric & Biol Eng. Open Accessat. <https://www.ijabe.org>. 2017; 10(1): 184–190.
8. Клёсов А. А. Древесно-полимерные композиты // СПб: Научные основы и технологии. 2010. 736 с.
9. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Данилова Р.В., Хазиева Д.Р. Исследование свойств древесно-полимерных композитов на основе термомодифицированного наполнителя // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 24. С. 53–55.
10. Editor Vijay Kumar Thakur. Green composites from natural resources. CRC Press; 2013; 419.
11. Соловьев П.В., Князьков Е.С. Обзор технологии получения древесно-полимерных композитов // Февральские чтения. 2017. С. 270–273.
12. Гиревая Х.Я., Шубина Н.И. Утилизация полимерных отходов путем получения древесно-полимерного композиционного материала и исследование его свойств // Теория и технология металлургического производства. 2012. № 12. С. 156–161.
13. Бурмакина Е.В., Основные характеристики и тенденции развития рынка древесно-полимерных композитов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. 2682–2686.
14. Нестерова А.В., Чернова А.О. Древесно-полимерные композиты, изготовленные методом экструзии // Молодежь и научно-технический прогресс. 2020. 286–290.
15. Валеев И.А. Исследование влияния наполнителя и связующего на физико-механические свойства древесно-полимерного композита // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 10. С. 40–42.
16. Юрченко В.В. Анализ модифицирующих добавок применяемых в термопластичных древесно-полимерных композитах // Сборник научных трудов ДонИЗТ. 2012. 30. 135–140.
17. Минскер К.С., Федосеева Г.Т. Деструкция и стабилизация поливинилхлорида. М.: Химия, 1972.
18. Якубовский С.Ф., Хорошко С.И. Свойства древесно-полимерных композитов, полученных из порошкообразного сополимера и древесных опилок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 106–109.

19. Gonzalez. J. Pastor J. De Saja. F. de la. Monitoring the UV degradation of PVC window frame by microhardness analysis. J. Appl. Polym. Sci. 38(1989): 1879–1882.

20. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Мухин Н.М. Получение и изучение свойств древесно-полимерных композитов с наполнителями из отходов растительного происхождения // Вестник Московского государственного университета леса // Лесной вестник. 2016. Т. 20, № 3. С. 101–105.

21. Шерышев М.А., Тихонов Н.Н. Производство профильных изделий из ПВХ. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 614 с.

22. Минскер К.С. Классификация смазок для ПВХ / К.С. Минскер, Л.И. Карпачева, Т.Б. Заварова, Л.Н. Малышев // Пластические массы. 1977. № 1. С. 29–31.

23. Милов В.И. Взаимосвязь между пластифицирующим действием смазок и технологическими параметрами экструзии композиций на основе ПВХ/ В.Б. Мозжухин, В.И. Максименко // Пластические массы. 1989. 12. 52–53.

24. Марсакова Е.В. Современные древесно-полимерные композиты // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования: сборник статей по материалам LXX студенческой международной научно-практической конференции. 2019. С. 17–27.

25. Лисицкий В.В. Механохимическая деструкция ПВХ / В.В. Лисицкий, А.П. Савельев, В.И. Манушкин, К.С. Минскер // Пластические массы. 1981. № 3. С. 24–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асфандиярова Лилия Рафиковна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой ОХТ, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия, asfand_lilya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-201X>

Хакимова Гузель Венеровна – старший преподаватель, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия, yunusovagv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0047-2676>

Овсянникова Инна Вячеславовна – старший преподаватель, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия, inna.ovsyannikova.80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5894-5531>

Матвеева Анна Юрьевна – техник-лаборант, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия, m-anna2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3142-1075>

ВКЛАД АВТОРОВ

Асфандиярова Л.Р. – идея, научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста.

Хакимова Г.В. – редактура и доработка текста статьи; переписка с издательством.

Овсянникова И.В. – сбор и обработка материала; итоговые выводы.

Матвеева А.Ю. – оформление статьи в соответствии с требованиями.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.10.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 09.11.2023.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558>

CC BY 4.0

Intelligent Eco-Monitoring System for Selecting a Residential Development Site with Nanofiber-Based Window Filter Screens

Mussa G. Bashirov , Rauf G. Vildanov , Alik M. Khafizov , Azat S. Khismatullin* , Damir Sh. Akchurin 

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

* Corresponding author: e-mail: hism5az@mail.ru

ABSTRACT: Introduction. The industrial activities result in the release of a significant number of pollutants into the atmosphere, which have a negative impact on human health and the environment. The development of sustainable principles for construction sites development requires the elaboration of algorithms, assessment methodologies, and monitoring of the environmental situation at the construction site. Analysis of research works in the field of environmental monitoring of air pollution by hazardous substances has shown that the speed and reliability of the obtained information are crucial in polluted atmospheric conditions. In this article, we examine the application of an intelligent environmental monitoring system with Salavat city Republic of Bashkortostan as the example. The article presents an example of continuous eco-monitoring using three automatic air pollution monitoring stations for controlling the atmospheric air in residential areas. **Methods and Materials.** An intelligent eco-monitoring system is proposed, which is capable of assessing the state of the air basin of an industrial city, identifying sources of increased air pollution, processing information using an artificial neural network in real-time, generating control actions on sources of increased air pollution, and providing recommendations to businesses for optimizing their operations to prevent exceeding the maximum allowable concentrations of harmful substances. **Results.** The analysis of air quality in Salavat has led to the conclusion that it is necessary to install window filter-screens with nanofiber-based filtering elements in residential buildings. **Discussion.** The results of the air basin monitoring can be used in an integrated intelligent environmental monitoring system for assessing environmental conditions and can be made available to interested parties. Considering the results in Salavat, the project can be replicated for use in eco-monitoring systems of towns and cities in the Russian Federation. **Conclusion.** As a result of the project, the program utilizing artificial intelligence has been developed, which will contribute to reducing the level of air pollution in the future.

KEYWORDS: nanotechnology, air pollution, nanofiber filter, environmental monitoring, automatic station, air monitoring, buildings and structures, artificial neural network.

ACKNOWLEDGMENTS: The study was carried out within the framework of the Strategic Project “New Living Environment” in accordance with the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030” and the implementation of the research project “Development of an Intelligent System for Environmental Monitoring of the Air Basin of the Salavat Urban District” for the period 2023–2024.

FOR CITATION: Bashirov M.G., Vildanov R.G., Khafizov A.M., Khismatullin A.S., Akchurin D.Sh. Intelligent Eco-Monitoring System for Selecting a Residential Development Site with Nanofiber-Based Window Filter Screens. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15(6): 552–558. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558>. – EDN: RUYMLC.

INTRODUCTION

Designing and organizing a construction site for large-scale development within urban boundaries requires the development of measures and solutions. All these factors require appropriate monitoring, risk assessment, and environmental restoration measures. As a result of industrial activities, a significant amount of pollutants is emitted into the atmosphere, negatively affecting hu-

man health and the environment. An analysis of current research on air pollution monitoring [1–5] has shown that it is accompanied not only by material losses but also by deterioration of health of the population in the nearby areas. Therefore, in the context of atmosphere pollution, the speed and reliability of the obtained information are of great importance. Solving such problems is impossible without the creation of automated systems for monitoring air pollution in industrially developed areas. This article

© Bashirov M.G., Vildanov R.G., Khafizov A.M., Khismatullin A.S., Akchurin D.Sh. 2023

examines the application of an intelligent environmental monitoring system using the example of Salavat city, Republic of Bashkortostan.

The city of Salavat is located on a flat area, stretching from north to south and bordered on the eastern side by the Belaya River. Based on the “wind rose,” the prevailing wind direction is from the southwest. The main part of the city lies at the lowest absolute elevations of 145–155 meters. Rising above at absolute elevations of 165–170 meters is the northern industrial zone, while the southern industrial zone is situated at elevations of 170–220 meters. The positioning of the residential area relative to the industrial zones leads to valley-shaped local effects that contribute to the accrual of pollutants in the air’s surface layer. Considering that there were 225 calm weather days in 2022, such meteorological conditions favor the concentration of harmful emissions in the atmosphere [6–7].

The aim and objective of the work is to create a center for receiving, controlling, automatic processing of information, to develop an artificial neural network for an intelligent system for analyzing the level of air pollution in the city of Salavat.

METHODS AND MATERIALS

According to source [7], in 2022, Salavat’s air pollution levels, in line with SanPin 2.1.6.3492-21 criteria, were raised and were primarily determined by the concentrations of formaldehyde, ammonia, and nitrogen dioxide. The annual average concentrations of the main pollutants such as sulfur dioxide, nitrogen oxide, carbon monoxide, suspended matters, nitrogen dioxide, and benzopyrene remain below permissible standards. An elevated level of emissions is bolstered by an increased proportion of fuel oil in the fuel mix of electric power enterprises.

The Salavat city administration in conjunction with Gazprom Neftekhim Salavat LLC have initiated an online system for monitoring air pollution in the urban air basin, allowing for swift detection of airborne contaminants whose concentration exceeds the maximum permissible concentration (MPC). This system facilitates the documentation and identification of gaseous emissions, data collection, and trend analysis of air pollution over time. Consequently, it assists environmental specialists in evaluating air quality in Salavat.

Currently, three pollution monitoring stations (PMS) operate in Salavat: a mobile bus station PMS-1 in a heavy-traffic area, and two stationary automatic stations, PMS-2 and PMS-3, for monitoring pollution levels in residential areas.

These monitoring posts are equipped with modern automatic air pollution stations (AAPS), functioning 24/7 and capable of identifying up to twenty-three different pollutants. Additionally, the AAPS station is equipped

with an ultrasonic weather station for the automated measurement of basic meteorological parameters [8–9].

Exceeding the maximum permissible concentrations of polluting gases can lead to serious consequences for human and animal health, as well as environmental degradation. Taking into account the “wind rose” (a graphical representation of wind directions and speeds in a certain area), it is possible to determine and assess which directions and how quickly these pollutants may be dispersing.

Data on harmful factors are gathered semi-hourly from various pollution monitoring stations (PMS). For a more detailed assessment, the data received from the AAPS stations were examined. Accordingly, the monitoring is carried out continuously, the readings are recorded in Excel files. These spreadsheets not only serve as records but also as potential datasets for training neural networks [10].

A detailed examination of the AAPS’s statistics revealed that the station placements within Salavat are strategically set to capture Maximum Permissible Concentrations (MPC) of pollutants: from the south at PMS No. 3 (Meleuz and Salavatsteklo JSC), centrally at PMS No. 2 (general situation within the city), and from the north at PMS No. 1 (Gazprom Neftekhim Salavat LLC, with processes occurring in Ishimbay and Sterlitamak). This strategic placement aids in surveilling air quality within specific city zones and identifying probable pollution sources.

RESULTS AND DISCUSSION

The solution to the problem is complex. Automated samplers in potential sources of contamination, if necessary, promptly inform special services about the environmental situation in the city of Salavat. These devices are equipped with special sensors and software. The authors have developed an integrated intelligent system for managing this system for monitoring and analysis of data concerning Salavat’s environmental status [10].

The use a neural network in the environmental monitoring system enhances the precision, oversight, dependability of the data gathering process, and the management of environmental conditions. This approach contributes to the minimization of negative environmental factors, as well as reducing the expenses associated with environmental strategies and interventions.

The principal element of the system, presented in Figure 2, is a neural network. This is a machine-learning approach that makes it possible to predict changes in the environmental situation based on existing data and trend analysis.

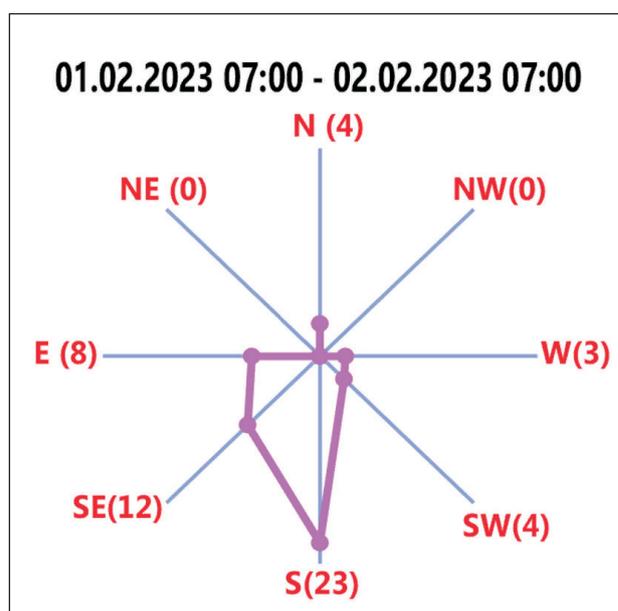
A neural network-based environmental monitoring system can be seamlessly integrated alongside other monitoring and control systems, such as light and temperature control systems in buildings, transport manage-

**Results of automated monitoring of pollutants in the atmospheric air (AASP)
according to B.S. Yulaeva, 8b Salavat from 01.02.2023 7:00 to 02.02.2023 7:00**

Ingredient	s.s. Concentration of pollutants mg/m ³	MPC s.s. mg/m ³	Excess in fractions of MPC s.s. ≥ 1	m.r. Concentration of pollutants mg/m ³	MPC m.r. mg/m ³	Excess in fractions of MPC m.r. ≥ 1	Time max. emission m.r. concentrations of pollutants
Ammonia	no data	0.1		no data	0.2		
Sulphur dioxide	0.0036	0.05		0.0064	0.5		01.02.2023 18:20
Hydrogen sulfide	0.0022	–		0.0049	0.008		01.02.2023 21:20
Carbon monoxide	0.6382	3.0		1.6016	5.0		01.02.2023 18:40
Particulate matter PM 10	no data	0.06		no data	0.3		
Particulate matter PM 2,5	no data	0.035		no data	0.16		
Particulate matter PM 1	no data	–		no data	–		
Nitric oxide	0.0319	–		0.1317	0.4		01.02.2023 18:40
Nitrogen dioxide	0.0595	0.1		0.1104	0.2		01.02.2023 22:20
Benzol	0.0091	0.06		0.0236	0.3		01.02.2023 20:30
Toluol	0.0106	–		0.0215	0.6		01.02.2023 20:00
Ethylbenzene	0.0005	–		0.0010	0.02		01.02.2023 20:00
m-, p-Xylol	0.0022	0.04		0.0044	0.25		01.02.2023 20:30
o-Xylol	0.0026	–		0.0040	0.3		02.02.2023 6:00
Chlorobenzene (C ₆ H ₅ Cl)	0.0001	–		0.0001	0.1		01.02.2023 10:00
Styrol (C ₈ H ₈)	0.0000	–			0.04		
Isopropylbenzene (C ₉ H ₁₂)	0.0000	–			0.014		
Alpha methylstyrene (C ₉ H ₁₀)	0.0003	–		0.0009	0.04		02.02.2023 6:00
Phenol (C ₆ H ₅ OH)	0.0000	0.006			0.01		
Acetone (C ₃ H ₆ O)	0.0788	–		0.3667	0.35	1.0	01.02.2023 20:30
Methanol (CH ₄ O)	0.0351	0.5		0.0738	1.0		01.02.2023 21:30
Ethylene (C ₂ H ₄)	0.0006	–		0.0036	3.0		02.02.2023 4:00
Dimethylamine (CH ₃ 2NH)	0.0000	0.0025			0.005		

Fig. 1. Example of data gathered by an AAPS station, indicating MPC and taking into account the “Wind Rose”

ment systems, etc. The intelligent environmental monitoring system aggregates real-time data at a centralized hub on pollutant levels from automated sampling and control equipment from AAPS, alongside information on atmospheric air conditions such as temperature, pressure, humidity, and forthcoming weather forecasts. The intelligent environmental monitoring system engages in the processing and surveillance of the data, forecasting of pollutant emissions, activation of preliminary contamination warning mechanisms, and formulation of guidelines regarding the maximum thresholds of safe emissions by optimizing operational loads on appliances. It automatically identifies the pollution sources and causes, amplifies air filtration quality, and regulates the reduction in transportation air pollution. Additionally,



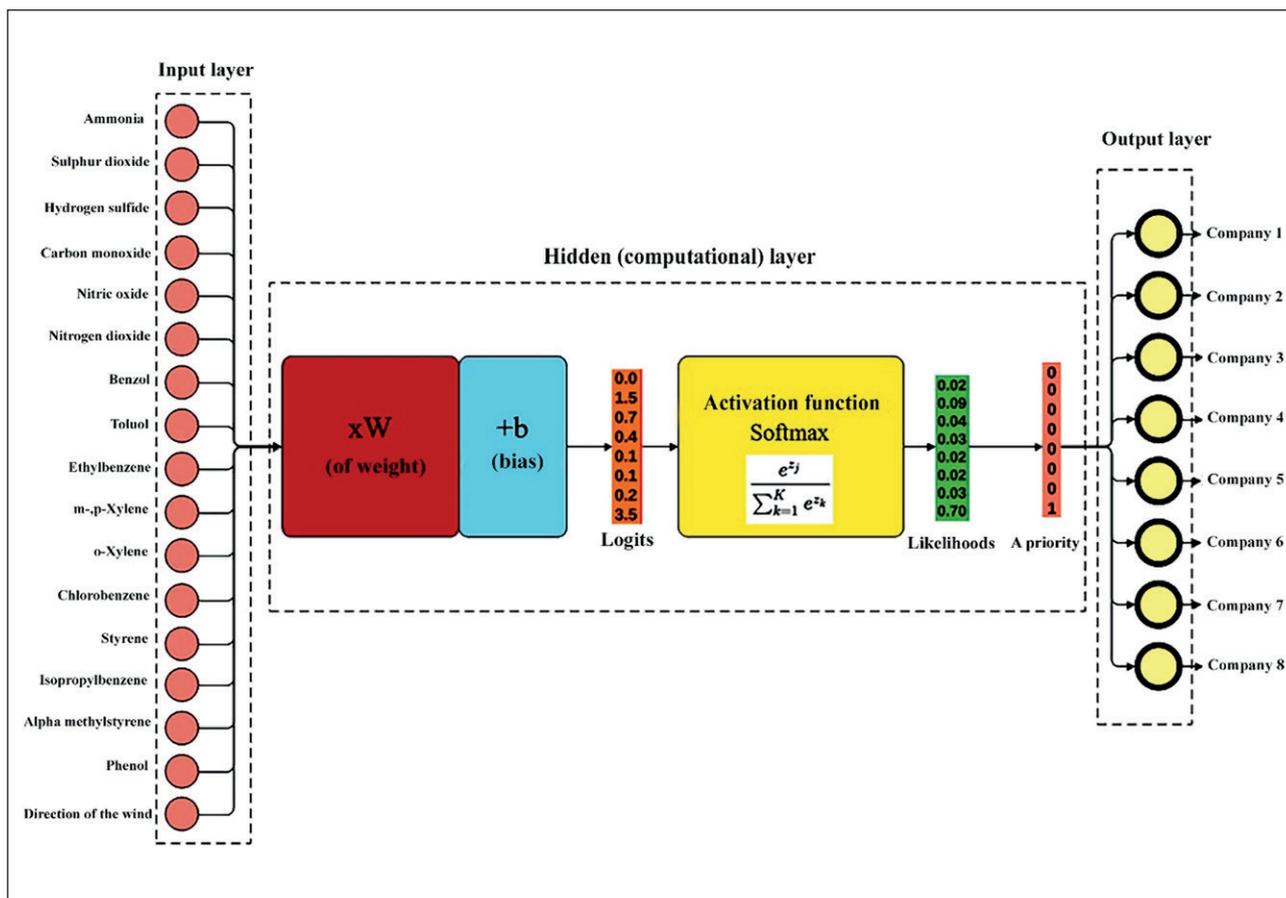


Fig. 2. Structure of an Intelligent Algorithm Based on a Logistic Regression Model

data are sent to municipal environmental monitoring centers and to petrochemical and industrial companies in order to adjust the general regulations on the emission of harmful gases.

An artificial neural network will analyze data from meteorological stations and automated chromatographs, as well as gas-analyzing systems of the online monitoring system for air pollution of Salavat. The intelligent system assesses the current state of pollution in the city’s air basin and predicts pollution progression scenarios, taking into account meteorological station data, weather forecasts, and formulates generates control actions on sources of intense air pollutants. It also provides recommendations for enterprises to optimize operational protocols to prevent exceeding the maximum permissible concentration of harmful substances in the city’s air basin.

The project of software interface design is shown in Figure 3. This interface is composed of input areas from AAPS data values, a display section for outcomes, and a ‘Calculate’ button.

The result of training an intelligent model is its accuracy. The accuracy stands at 59.73%, indicating a correlation between the parameters and the practical significance of the study. The relatively low accuracy is attributed to

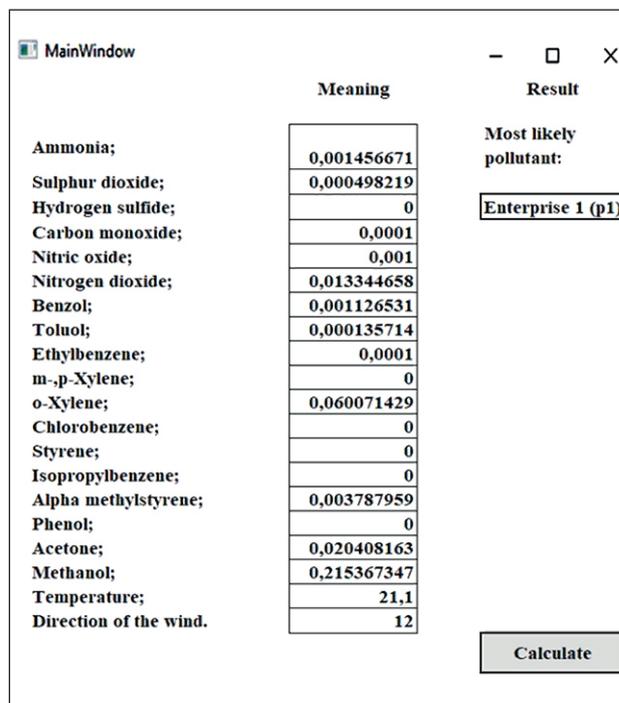


Fig 3. Program Interface Project

the limited amount of statistical data collected, which is an area for further investigation.

The intelligent environmental monitoring system can be constantly improved by incorporating new devices with enhanced metrological characteristics. Additionally, the system can benefit from the integration of web technologies for comparing and exchanging data with other sources. The findings from monitoring the air basin can be utilized in an integrated intelligent system for monitoring environmental pollution, including soil and water contamination, as well as the impact on flora and fauna. These results can be shared with interested parties to evaluate the environmental situation and contribute to fostering «transparency in environmental matters» [11–15]. Taking into account the results in the city of Salavat, this project can be replicated for the implementation of environmental monitoring systems in small and medium-sized towns and cities across the Russian Federation.

Following the analysis of air samples, the intelligent environmental monitoring system suggests the installation in residential buildings a window filter-screen with nanofiber-based filtering elements, such as the one offered by Respilon [16].

Table 1

Test Results of a window filter-screen with nanofiber-based filtering elements

Filtration Efficiency	Filter-screen “Respilon”
1.0 µm particles	82.9 %
2.5 µm particles	97.6 %
5.0 µm particles	100 %

A window filter-screen with nanofiber-based filtering element is a filter made of nanofibers that have a diameter of about a few nanometers, designed to be installed in windows. It forms a barrier against the penetration of dust, pollen, including viruses and bacterial spores. It also helps inhibit the spread of mold while providing high permeability to air, gases, and water vapors. The particles are captured mechanically. Thus, the membrane is suitable for use in homes where individuals suffer from allergies, asthma, cardiovascular disorders, lung diseases, or reside in areas with high levels of air pollution.

The unique filtration ability is provided by a layer of nanofibers.

The membrane of Respilon company consists of three layers:

Layer 1: A breathable mesh frame that provides protection against dust, insects and other particles, while allowing for proper air circulation.

Layer 2: A filtering breathable membrane made of nanofiber, capable of retaining and trapping fine particles of several nanometers in size. This membrane has high air permeability, ensuring good air circulation while effectively capturing contaminants. The use of such filter-permeable nanofiber membranes helps improve indoor air quality and protect individuals from harmful outside emissions.

Layer 3: A breathable protective mesh used to protect against dust, insects, and prevent unwanted elements from entering the room.

An intelligent environmental monitoring system can be used to optimize the production of nanofiber materials to achieve higher filtration efficiency of incoming air. Additionally, by integrating environmental monitoring and controlling the filtration process of atmospheric air entering the room, the system can improve the performance and durability of filters.

In Salavat, the main air pollutants consist of chemical elements ranging in size from 3 to 8 nanometers. Therefore, it is advisable to minimize the inhalation of these “gases”. Installing air handling units (breathers) at home or in the workplace is recommended, as these units have filters that trap harmful substances before they enter the room from the outside [17].

CONCLUSION

The proposed intelligent environmental monitoring system offers a comprehensive assessment of the air quality in the city. It provides recommendations to developers of residential complexes regarding the most environmentally friendly areas for development. The system can identify sources of increased air pollution and utilizes an artificial neural network to process information. Based on the data analysis, the intelligent environmental monitoring system generates recommendations for enterprises to optimize their operations and reduce their impact on the environment.

As a result of the project, the program with AI was created for further reducing the level of air pollution [8].

It is crucial to incorporate filter meshes with nanofiber-based filter elements and air handling units (breathers) in order to protect respiratory organs from harmful substances, odors, and smog in large cities. These elements trap harmful substances before they enter living or working spaces from the outside.

Further application of the intelligent environmental monitoring system has the potential to lead to more efficient, intelligent and adaptive nanofiltration systems that can be applied in various contexts and offer significant benefits for human health, safety, and the environment [8–25].

REFERENCES

1. Ivashchuk O.A., Chudnyy Y.P. Construction of an ecomonitoring system in the organization of automated management of environmental safety of the industrial and transport complex. *Information Systems and Technologies*. 2009; 2.52 (563): 61-68.
2. Rada A.O., Kuznetsov A.D., Zverev R.E., Timofeev A.E. Automation of monitoring of construction work based on laser scanning from unmanned aircraft. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(4): 373-382.
3. Rudko I.D., Khoroshko L.L., Keino P.P. Automation of the Process of Ecological Monitoring in Specially Protected Natural Areas of the Russian Federation on the Basis of the DIRECTUM RX Content Management System. *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 34(2):145-158.
4. Liu Y., Starzyk J.A., Zhu Z. Optimized approximation algorithm in neural networks without overfitting. *IEEE Trans Neural Network*. 2008; 9:83-95.
5. Korshak A.A., Nikolaeva A.V., Nagatkina A.S., Gaisin M.T., Korshak A.A., Pshenin V.V. Methods of forecasting the degree of vapor capture of hydrocarbons in absorption. *Science and Technology of Pipeline Transportation of Oil and Petroleum Products*. 2020; 10(2): 202-209.
6. Bashkiria is among the top ten regions – the main air pollutants: the report of the News Agency “Bashinform” on the environmental situation in the Republic of Bashkortostan. [Electronic resource] URL: <https://pravdapfo.ru/news/bashkiriya-voshla-v-desyatku-regionov-samyh-sereznyh-zagryaznitelej-vozduha> (accessed: 27.10.2023).
7. Monthly review of the state of the environment in the territory of the Republic of Bashkortostan. August 2022. [Electronic resource] URL: <https://view.officeapps.live.com> (accessed: 27.10.2023).
8. Atmospheric air quality in Salavat for 29.06.2023. [Electronic resource] Available at: <https://salavat.bashkortostan.ru/presscenter/news/552462/> (accessed: 07.11.2023).
9. Exceedance of maximum permissible concentration of aromatic hydrocarbons in Salavat. [Electronic resource]. – URL: <http://www.meteorb.ru/monitoring/air-pollution-salavat/prevysheniye-pdk-aromaticeskikh-uglevodorodov-salavat> (accessed: 12.08.2023).
10. Certificate of State Registration of Computer Program 2023667488 The Russian Federation. Artificial neural network software for ambient environmental monitoring system. Bashirov M.G., Akchurin D.Sh., Khafizov A.M., Khismatullin A.S.; Applicant and copyright holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ufa State Petroleum Technological University”. – № 2023666492; declared. 08.08.2023; publ.15.08.2023.
11. Decree of the President of the Russian Federation dated April 19. 2017. No. 176. “On the Strategy of Environmental Safety of the Russian Federation for the Period up to 2025”. [Electronic resource] Available at: <http://pravo.gov.ru> (accessed: 08.08.2023).
12. Fadeev M.A., Isaeva L.N. Application of neural networks for determining the degree of atmospheric air pollution. Proceedings of the XI-th International Student Scientific Conference “Student Scientific Forum”. URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018013816> (accessed: 25.10.2023).
13. Vasilev I., Hismatullin A. The theory of fuzzy sets as a means of assessing the periods of service of asynchronous electric motors. Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. 2020: 9111887.
14. Khismatullin A.S., Gumerova L.V., Mamleev I.I., Sayfutdinov V.K. Application of the artificial intelligence system for assessing the state of isolation of oil-filled cable lines. *Forging and stamping production. Material Forming*. 2023; 3: 51-56.
15. Nemirovskiy A., Gracheva E., Bashirov M. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. In the collection: *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. Iss. “Lecture Notes in Civil Engineering.”* 2021; 155-166.
16. CleanAir Window Nanomembrane. URL: <https://respilon.ru/> (accessed: 25.10.2023).
17. Healthy microclimate at home and at work. URL: <https://www.ventoved.ru/product-page/tion-o2-standart> (accessed: 25.10.2023).
18. Gumerova L.V., Khismatullin A.S. Application of the artificial intelligence system for forecasting the state of insulation of oil-filled cable lines. In the collection: *Science. Technology. Production – 2023. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of Gazprom Neftekhim Salavat LLC*. 2023; 112-114.
19. Bashirov M.G., Akhmetshina E.I., Khakimov A.F., Shvan M.F. Development of a neural network for the management of an educational and research laboratory complex. In the collection: *Science. Technology. Production – 2023. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of Gazprom Neftekhim Salavat LLC*. 2023; 188-191.

20. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Akchurin D.Sh., Kislitsyn N.A. Software of the virtual laboratory stand based on the emulator of the microprocessor controller OWEN PLK-110-30. Certificate of registration of the computer program RU 2021614985, 01.04.2021. Application No. 2021614069, dated 24.03.2021.

21. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Kislitsyn N.A., Akchurin D.Sh. Educational laboratory stand for the study of technical means of automation and the basics of control of technological processes. Patent for a utility model RU 206052 U1. 18.08.2021. Application No. 2021110458 dated 13.04.2021.

22. Mullakaev R.M., Mullakaev M.S. Ultrasound in the Processes of Oil-Polluted Wastewater Treatment: An Overview. *Ecology and Industry of Russia*. 2021; 25(3): 53–59.

23. Bashirov M.G., Bashirova E.M., Yusupova I.G., Akchurin D.Sh., Yulberdin R.T. Identification of the stress-deformed state and damage of the metal structure of construction structures with nanocoatings of the electromagnetic and acoustic method. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(5): 482–493.

24. Khismatullin A.S., Gareev I.M. Investigation of the Transfer of an Integral Parameter in Liquids with Gas Bubbles. *Ecological Systems and Devices*. 2015; 7:38–42.

25. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory Heat Transfer in Liquids with Gas Bubbles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012; 19 (5): 595–612.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mussa G. Bashirov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Russia, eapp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>

Rauf G. Vildanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Russia, vildanov.rauf@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3977-046X>

Alik M. Khafizov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Russia, alik_hafizov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6008-6588>

Azat S. Khismatullin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Russia, him5az@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6397-2278>

Damir Sh. Akchurin – assistant, Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Russia, akihiro177@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2174-8216>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Mussa G. Bashirov – Scientific Supervisor; development of the concept and methodology of the study; analysis of the study results; writing an article; drawing conclusions.

Rauf G. Vildanov – conducting research, analyzing the results and discussion, preparing a list of references.

Alik M. Khafizov – writing the text for Methods and Materials section, graphical and tabular presentation of the research results.

Azat S. Khismatullin – preparation and writing of the text for Methods and Materials the section, data processing.

Damir Sh. Akchurin – development of an artificial neural network, processing and analyzing experimental data with machine learning methods.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 24.10.2023; approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 07.12.2023.

Научная статья

УДК 504.75

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558>

CC BY 4.0

Интеллектуальная система экомониторинга для выбора участка застройки жилых домов с применением оконных сеток-фильтров на основе нановолокна

Мусса Гумерович Баширов , Рауф Гибадуллович Вильданов , Алик Мусаевич Хафизов ,
Азат Салаватович Хисматуллин* , Дамир Шамилевич Акчурин 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: hism5az@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. В результате деятельности промышленности в атмосферу выбрасывается большое количество загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Разработка принципов устойчивого проектирования строительных площадок требует проработки алгоритмов, методик оценки и мониторинга экологической ситуации на строительной площадке. Анализ работ в области экологического мониторинга загрязнения атмосферы вредными веществами показал, что в условиях загрязнения атмосферы важное значение имеет скорость и достоверность получаемой информации. Рассмотрим применение интеллектуальной системы экологического мониторинга на примере г. Салават Республики Башкортостан. В статье рассмотрен пример непрерывного экомониторинга с использованием трех автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха для мониторинга атмосферного воздуха жилой зоны. **Методы и материалы.** Предложена интеллектуальная система экомониторинга, способная дать оценку состояния воздушного бассейна промышленного города, идентифицировать источники повышенной загрязнённости воздуха, обработать информацию с помощью искусственной нейронной сети в онлайн-режиме, формировать управляющие воздействия на источники повышенного загрязнения воздуха и рекомендации предприятиям по оптимизации режима работы для предотвращения превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ. **Результаты.** В результате проведенного анализа воздуха в г. Салават пришли к выводу о необходимости установки в жилых зданиях оконных сеток-фильтров с фильтрующим элементом на основе нановолокна. **Обсуждение.** Результаты мониторинга воздушного бассейна могут использоваться в интегрированной интеллектуальной системе экомониторинга загрязнённости окружающей среды, могут быть предоставлены заинтересованным лицам для оценки экологической ситуации. С учетом результатов эксплуатации в городе Салавате проект может быть тиражирован для использования в системах экомониторинга малых и средних городов Российской Федерации. **Выводы.** В результате выполнения проекта создана программа с применением искусственного интеллекта, позволяющая в дальнейшем снизить уровень загрязнения атмосферного воздуха.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнологии, загрязнение воздуха, нановолоконный фильтр, экологический мониторинг, автоматическая станция, мониторинг воздуха, здания и сооружения, искусственная нейронная сеть.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках Стратегического проекта «Новая среда жизни» в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и реализации научно-исследовательского проекта «Разработка интеллектуальной системы экологического мониторинга воздушного бассейна городского округа г. Салават» на период 2023–2024 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баширов М.Г., Вильданов Р.Г., Хафизов А.М., Хисматуллин А.С., Акчурин Д.Ш. Интеллектуальная система экомониторинга для выбора участка застройки жилых домов с применением оконных сеток-фильтров на основе нановолокна // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 6. С. 552–558. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558>. – EDN: RUYMLC.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и организация строительной площадки для проведения работ по крупномас-

штабным застройкам в границах городской территории требуют разработки мероприятий и решений. Все эти факторы нуждаются в соответствующем мониторинге, оценке риска и мер экологического

© Баширов М.Г., Вильданов Р.Г., Хафизов А.М., Хисматуллин А.С., Акчурин Д.Ш., 2023

восстановления. В результате деятельности промышленности в атмосферу выбрасывается значительное количество загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Анализ существующих в настоящее время работ в области экомониторинга загрязнения атмосферы вредными веществами [1–5] показал, что они сопровождаются не только материальными потерями, но и ухудшением здоровья населения прилегающих территорий, поэтому в условиях загрязнения атмосферы важное значение имеет скорость и достоверность получаемой информации. Решение подобных задач невозможно без создания автоматизированных систем мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых территорий. В статье рассмотрено применение интеллектуальной системы экологического мониторинга на примере г. Салават Республики Башкортостан.

Город Салават находится на равнинной территории, вытянут с севера на юг ограниченной с восточной стороны рекой Белая согласно «розе ветров», преобладающим направлением ветра является юго-западное. Основная часть города расположена на самых низких абсолютных отметках 145–155 м. Выше ее по поверхности на абсолютных отметках 165–170 метров находится площадка северной промышленной зоны, а на отметках 170–220 м. – площадка южной промышленной зоны. Такое расположение жилого массива по отношению к промышленным зонам вызывает долинные локальные эффекты и способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Учитывая, что в 2022 году безветренная погода составила 225 дней в году, то такие метеорологические условия благоприятствуют накоплению вредных выбросов в атмосфере [6–7].

Целью и задачей работы является создание центра приема, контроля, автоматической обработки информации, разработать искусственную нейронную сеть интеллектуальной системы анализа уровня загрязнения воздушного бассейна города Салават.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Согласно данным [7], в 2022 году уровень загрязнения атмосферы в соответствии с критериями СанПин 2.1.6.3492-21 в городе Салават повышенный и определяется в основном концентрациями формальдегида, аммиака, диоксида азота. Средние за год концентрации основных определяемых загрязнителей: диоксида серы, оксида азота, оксида углерода, взвешенных веществ, диоксида азота, бензапирена – ниже допустимых норм. Повышенный объем выбросов в атмосферу поддерживается вследствие увеличения доли мазута в топливном балансе предприятий электроэнергетики.

Администрация г. Салават совместно с ООО «Газпром нефтехим Салават» создали систему онлайн-мониторинга загрязненности воздушного бассейна города, которая позволяет оперативно выявлять наличие в воздухе загрязняющих веществ, концентрация которых превышает ПДК. Данная система онлайн мониторинга загрязненности воздуха используется для фиксации и определения типа выброса газов, сбора данных и проведения анализа трендов об уровне загрязнения воздуха на протяжении периода выброса. Это помогает специалистам по охране окружающей среды определить качество атмосферного воздуха в городе Салават.

В данный момент в г. Салават функционируют три поста наблюдения загрязнений (ПНЗ): одна передвижная автостанция ПНЗ – 1 в районе с интенсивным движением автотранспорта и две стационарные автоматические станции ПНЗ – 2 и ПНЗ – 3 по контролю уровня загрязненности в жилых районах.

Посты наблюдения загрязнений оснащены современными автоматическими станциями контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА), которые работают в круглосуточном режиме и способны фиксировать до двадцати трех загрязняющих веществ. Кроме того, станция АСКЗА оснащена ультразвуковой метеостанцией для автоматической фиксации основных метеорологических параметров [8–9].

Превышение предельно-допустимых концентраций загрязняющих газов может привести к серьезным последствиям для здоровья людей и животных, а также к разрушению окружающей среды, а учитывая «розу ветров» (это графическое изображение направлений и скорости ветра в определенной местности), можно определить и оценить, куда и как быстро могут распространяться загрязняющие вещества.

Данные по вредным факторам фиксируются один раз в тридцать минут (на разных ПНЗ). Для более детальной оценки статистики проанализировали данные, полученные со станций АСКЗА. Соответственно, контроль ведется непрерывно, показания записываются в Excel файлы, которые можно в дальнейшем применять для обучения нейронной сети [10].

После анализа статистики с АСКЗА установлено, что станции в настоящее время расположены в городе Салават таким образом, чтобы фиксировать ПДК вредных факторов с южного направления – ПНЗ № 3 (Мелеуз, АО «Салаватстекло»), по центру города – ПНЗ № 2 (общая картина в городе), с северного направления – ПНЗ № 1 (ООО «Газпром нефтехим Салават», производства Ишимбая и Стерлитамака). Информация, поступающая от них, помогает отслеживать уровень загрязнения воздуха в конкретных районах города и определять вероятный источник загрязнения.

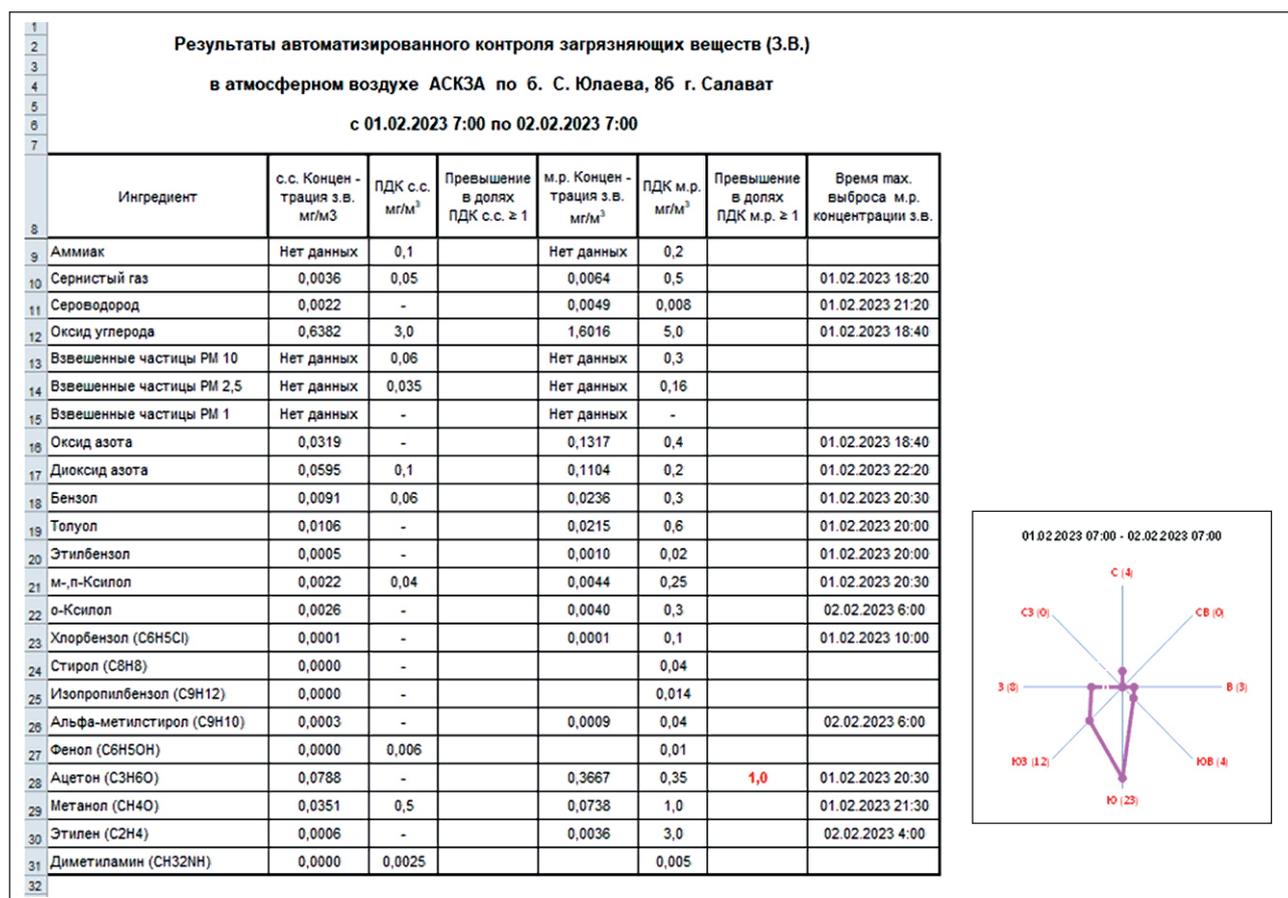


Рис. 1. Пример данных со станции АСКЗА с наличием превышения ПДК и учетом «Розы ветров»

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение проблемы имеет комплексный характер. Автоматизированные пробоотборники в потенциальных очагах загрязнения в случае необходимости оперативно информируют специальные службы об экологической обстановке в г. Салават. Эти устройства оснащены специальными датчиками и программным обеспечением. Авторами разработана интегрированная интеллектуальная система для управления данной системы для контроля и обработки информации об экологической обстановке в городе [10].

Применение системы экологического мониторинга на основе нейронной сети позволяет улучшить точность, контроль, надежность процесса сбора данных и управление экологической ситуацией, снизить воздействие негативных факторов на окружающую среду, а также сократить расходы на экологические мероприятия и решения.

Основным элементом системы, представленной на рис. 2, является нейронная сеть – метод машинного обучения, который позволяет предсказывать изменения в экологической ситуации на основе существующих данных и анализа тенденций.

Система экологического мониторинга на основе нейронной сети может быть интегрирована с другими системами контроля и управления, такими как системы управления светом и температурой в зданиях, системы управления транспортом и т.д.

В интеллектуальную систему экологического мониторинга поступают данные в единый центр в реальном режиме данных по содержанию загрязняющих веществ от АСКЗА, температуре, давлению и влажности атмосферного воздуха, и прогноз погоды на ближайшие дни. Далее интеллектуальная система экологического мониторинга обрабатывает и проводит мониторинг и предсказание выбросов вредных веществ, запускается система раннего предупреждения загрязнения, вырабатываются рекомендации по максимальному пределу возможных безопасных выбросов путем оптимизации загрузки аппаратов и устройств, определяются автоматически источники и причины загрязнения, повышение качества фильтрации воздуха, а также контролируется снижение загрязнения воздуха городским транспортом. Также информация поступает в городской центр по экологическому мониторингу и на нефтехимические и промышленные предприятия

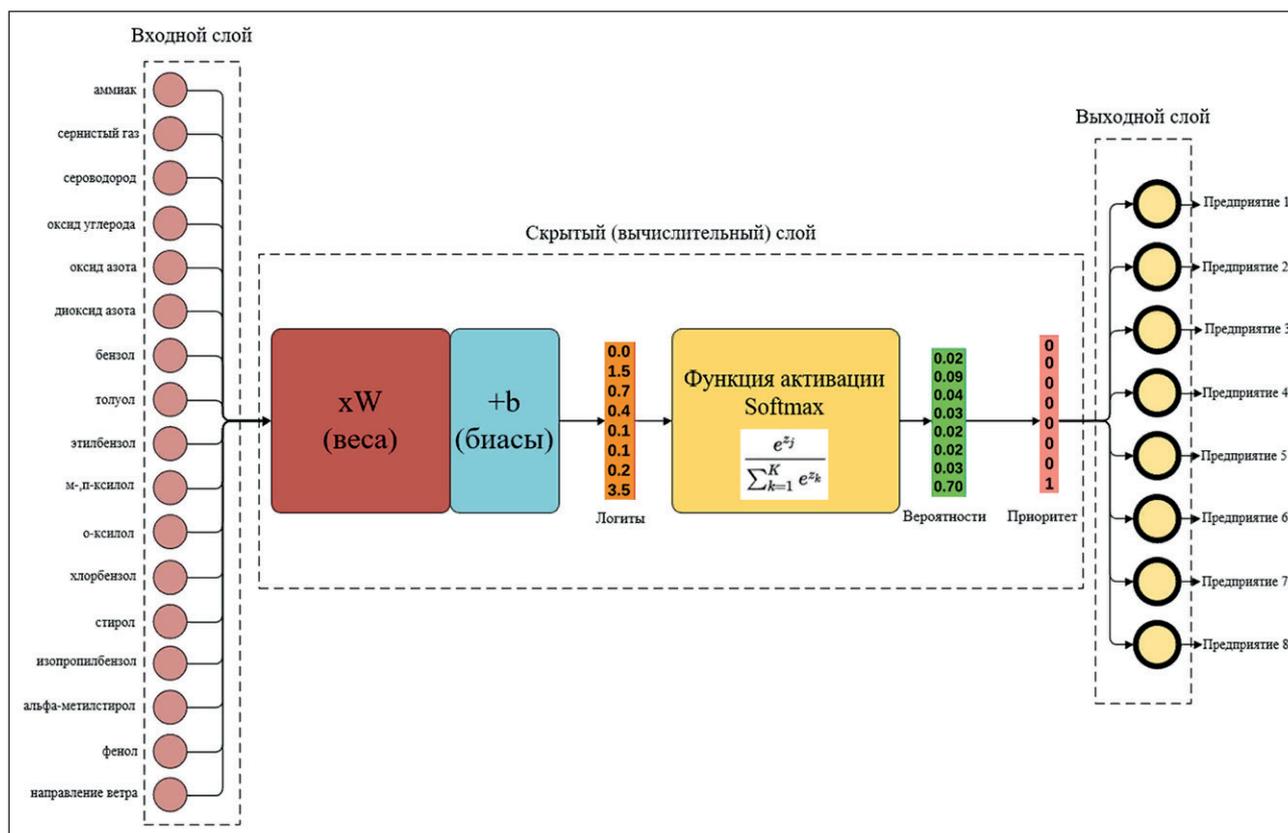


Рис. 2. Структура интеллектуального алгоритма на основе модели логистической регрессии

с целью корректировки общего регламента по выбросу вредных газов.

Анализ искусственной нейронной сетью будут подвергаться результаты измерений метеостанций и автоматических хроматографов и газоанализаторов системы онлайн – мониторинга загрязненности воздушного бассейна города Салават. Интеллектуальная система оценивает текущее состояние загрязненности воздушного бассейна города и прогнозирует сценарий развития загрязненности с учетом данных метеостанций городов, прогноза погоды, формирует управляющие воздействия на источники повышенного загрязнения воздуха и рекомендации предприятиям по оптимизации режима работы для предотвращения превышения ПДК вредных веществ в воздушном бассейне города.

Проект интерфейса программы изображен на рис. 3. Он состоит из полей для ввода значений с данных АСКЗА, поля для вывода результата и кнопки «Рассчитать».

Результатом обучения интеллектуальной модели служит ее точность. На данный момент она составляет 59,73%, из чего следует, что зависимость между параметрами есть и исследование имеет практический смысл. Недостаточно высокий показатель точности обусловлен малым количеством собранных

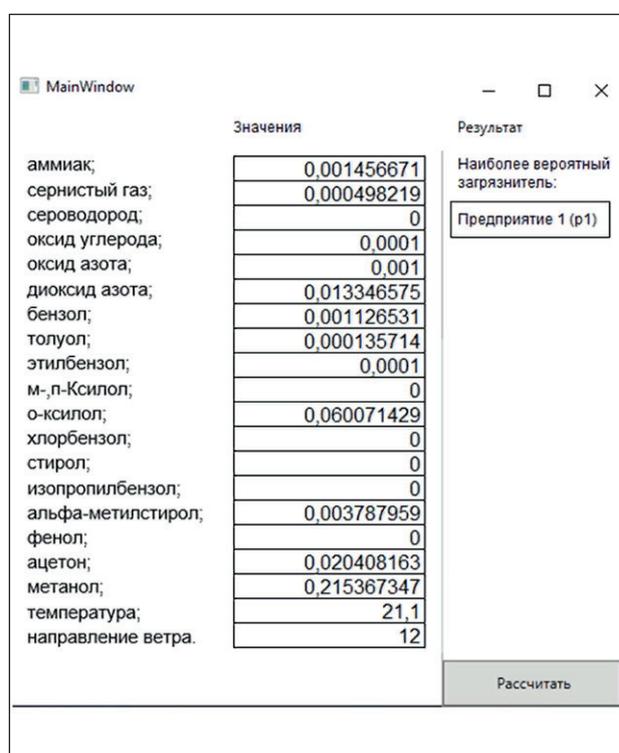


Рис. 3. Проект интерфейса программы

статистических данных, что и является дальнейшей задачей исследования.

Интеллектуальная система экологического мониторинга способна постоянно совершенствоваться за счет добавления новых приборов с улучшенными метрологическими характеристиками, внедрения web-технологий для сравнения и обмена данными с другими источниками. Результаты мониторинга воздушного бассейна могут использоваться в интегрированной интеллектуальной системе экологического мониторинга загрязненности окружающей среды, включая загрязненность почвы, водоемов, флоры и фауны, могут быть предоставлены заинтересованным лицам для оценки экологической ситуации, помогут сформировать имидж «экологической открытости» [11–15]. С учетом результатов эксплуатации в городе Салавате проект может быть тиражирован для использования в системах экологического мониторинга малых и средних городов Российской Федерации.

В результате проведенных анализов проб воздуха интеллектуальная система экологического мониторинга рекомендует в жилых зданиях установить сетку-фильтр с фильтрующим элементом на основе нановолокна, например, компании Respilon [16].

Таблица 1

Результаты тестирования сетки-фильтр с фильтрующим элементом на основе нановолокна

Эффективность фильтрации	Сетка «Respilon»
частицы размеров 1,0 мкм	82,9%
частицы размеров 2,5 мкм	97,6%
частицы размеров 5,0 мкм	100%

Оконная сетка-фильтр с фильтрующим элементом на основе нановолокна – это фильтр, изготовленный из нановолокон, которые имеют диаметр порядка нескольких нанометров, предназначенных для установки в окна, и формирует барьер от проникновения пыли, пыльцы, включая вирусы и споры бактерий. Она также помогает воспрепятствовать распространению плесени, при этом обеспечивая высокую проницаемость воздуха, газов и паров воды. Улавливание частиц происходит механически. Таким образом, мембрана подходит для использования в домах, где обитают люди, страдающие аллергией и астмой так же, как те люди, которые страдают сердечно-сосудистыми расстройствами или легочными заболеваниями, живущие в зонах или регионах с высоким уровнем загрязнения воздушной среды.

Уникальную способность фильтрации обеспечивает слой из нановолокна.

Мембрана компании Respilon имеет трехслойную структуру:

слой 1 – воздухопроницаемая сетка-каркас, обеспечивающая защиту от пыли, насекомых и других частиц, сохраняя при этом циркуляцию воздуха,

слой 2 – фильтрующая воздухопроницаемая мембрана из нановолокна, позволяет удерживать и улавливать мельчайшие частицы размерами несколько нм. Этот тип мембраны обладает высокой воздухопроницаемостью, т.е. обеспечивается хорошая циркуляция воздуха, при этом удерживаются загрязнения. Использование таких фильтрующих воздухопроницаемых мембран из нановолокна помогает улучшить качество воздуха в помещении и защитить людей от вредных выбросов в атмосферу.

слой 3 – воздухопроницаемая защитная сетка, используется для защиты от пыли и насекомых и для предотвращения попадания нежелательных элементов в помещение.

Интеллектуальная система экологического мониторинга может быть использована для оптимизации производства нановолоконных материалов, для того чтобы добиться более высокой эффективности фильтрации поступающего воздуха. Также система, используя экологический мониторинг и контроль процесса фильтрации атмосферного воздуха, поступающего в помещение, позволит улучшить производительность и долговечность фильтров.

Основными загрязнителями воздуха в г. Салавате являются химические элементы размерами 3–8 нм, поэтому желательно минимизировать вдыхание всех этих «газов», также рекомендуется установить дома/на работе приточные установки (бризеры), фильтры которых задерживают вредные вещества перед их попаданием с улицы в помещение [17].

ВЫВОДЫ

Предлагаемая интеллектуальная система экологического мониторинга способна дать интегральную оценку экологического состояния воздушного бассейна города, застройщикам жилых комплексов рекомендовать наиболее экологические районы застроек, идентифицировать источники повышенной загрязненности воздуха, обработать информацию с помощью искусственной нейронной сети, и интеллектуальная система экологического мониторинга формирует рекомендации предприятиям по оптимизации режима работы.

В результате выполнения проекта создана программа с применением ИИ, позволяющая в дальнейшем снизить уровень загрязнения атмосферного воздуха [8].

Сетка-фильтр с фильтрующим элементом на основе нановолокна и приточные установки (бризеры), фильтры которых задерживают вредные вещества перед их попаданием с улицы в помещение, являются необходимыми элементами для защиты органов дыхания от вредных выбросов, запахов, смога в крупных городах.

Дальнейшее применение интеллектуальной системы экологического мониторинга может привести к созданию более эффективных, умных и адаптивных систем наночистоты, которые могут быть применены в различных областях и принести большие выгоды для здоровья и безопасности людей, а также для окружающей среды [8–25].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иващук О.А., Чудный Ю.П. Построение системы экомониторинга при организации автоматизированного управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса // Информационные системы и технологии. 2009. № 2/52(563). С. 61–68.
2. Рада А.О., Кузнецов А.Д., Зверев Р.Е., Тимофеев А.Е. Автоматизация мониторинга строительных работ на основе лазерного сканирования с беспилотных воздушных судов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 4. С. 373–382.
3. Рудько И.Д., Хорошко Л.Л., Кейно П.П. Автоматизация процесса экологического мониторинга в особо охраняемых природных территориях российской федерации на базе системы управления контентом DIRECTUM RX // Труды Института системного программирования РАН. 2022. Т. 34. № 2. С. 145–158.
4. Liu Y., Starzyk J.A., Zhu Z. Optimized approximation algorithm in neural networks without overfitting. *IEEE Trans Neural Network*. 2008; 9:83–95.
5. Коршак А.А., Николаева А.В., Нагаткина А.С., Гайсин М.Т., Коршак А.А., Пшенин В.В. Методика прогнозирования степени улавливания паров углеводородов при абсорбции // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2. С. 202–209.
6. Башкирия вошла в десятку регионов – основных загрязнителей воздуха: отчет ИА «Башинформ» по экологической обстановке в Республике Башкортостан. [Электронный ресурс] URL: <https://pravdapfo.ru/news/bashkiriya-voshla-v-desyatu-ku-regionov-samyh-sereznyh-zagryaznitelej-vozduha> (дата обращения: 27.10.2023).
7. Ежемесячный обзор состояния окружающей среды на территории республики Башкортостан. Август 2022 года. [Электронный ресурс] URL: <https://view.officeapps.live.com> (дата обращения: 27.10.2023).
8. Качество атмосферного воздуха в г. Салавате за 29.06.2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://salavat.bashkortostan.ru/presscenter/news/552462/> (дата обращения: 07.11.2023).
9. Превышение ПДК ароматических углеводородов г. Салават. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteorb.ru/monitoring/air-pollution-salavat/prevysheniye-pdk-aromaticheskikh-uglevodorodov-salavat> (дата обращения: 12.08.2023).
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023667488 Российская Федерация. Программное обеспечение с применением искусственной нейронной сети для системы экомониторинга атмосферного воздуха / М.Г. Баширов, Д.Ш. Акчурин, А.М. Хафизов, А.С. Хисматуллин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2023666492; заявл. 08.08.2023; опубл. 15.08.2023. 1 с.
11. Указ Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года». [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 08.08.2023).
12. Фадеев М.А. Применение нейронных сетей для определения степени загрязнения атмосферного воздуха / М.А. Фадеев, Л.Н. Исаева // Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018013816> (дата обращения: 25.10.2023).
13. Vasilev I., Hismatullin A. The theory of fuzzy sets as a means of assessing the periods of service of asynchronous electric motors. *Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*. 2020: 9111887.
14. Хисматуллин А.С., Гумерова Л.В., Мамлеев И.И., Сайфутдинов В.К. Применение системы искусственного интеллекта для оценки состояния изоляции маслонаполненных кабельных линий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 3. С. 51–56.
15. Nemirovskiy A., Gracheva E., Bashirov M. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. In the collection: *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. Iss. "Lecture Notes in Civil Engineering."* 2021; 155–166.
16. Оконная наномембрана CleanAir. URL: <https://respilon.ru/> (дата обращения: 25.10.2023).
17. Здоровый микроклимат дома и на работе. URL: <https://www.ventoved.ru/product-page/tion-o2-standart> (дата обращения: 25.10.2023).
18. Гумерова Л.В., Хисматуллин А.С. Применение системы искусственного интеллекта для прогнозирования состояния изоляции маслонаполненных кабельных линий // Наука. Технология. Производство – 2023. Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию ООО «Газпром нефтехим Салават». 2023. С. 112–114.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

19. Баширов М.Г., Ахметшина Э.И., Хакимов А.Ф., Шван М.Ф. Разработка нейронной сети для управления учебно-исследовательским лабораторным комплексом // Наука. Технология. Производство – 2023. Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию ООО «Газпром нефтехим Салават». 2023. С. 188–191.

20. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Акчурин Д.Ш., Кислицын Н.А. Программное обеспечение виртуального лабораторного стенда на основе эмулятора микропроцессорного контроллера ОВЕН ПЛК-110-30 // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021614985, 01.04.2021. Заявка № 2021614069 от 24.03.2021

21. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Кислицын Н.А., Акчурин Д.Ш. Учебный лабораторный стенд для изучения технических средств автоматизации и основ управления технологическими процессами // Патент на полезную модель RU 206052 U1, 18.08.2021. Заявка № 2021110458 от 13.04.2021.

22. Муллакаев Р.М., Муллакаев М.С. Ультразвук в процессах очистки нефтезагрязненных стоков: обзор // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 3. С. 53–59.

23. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш., Юлбердин Р.Т. Идентификация напряженно-деформированного состояния и поврежденности структуры металла строительных конструкций с нанопокрывтиями электромагнитно-акустическим методом // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 5. С. 482–493.

24. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Исследование переноса интегрального параметра в жидкости с газовыми пузырьками // Экологические системы и приборы. 2015. № 7. С. 38–42.

25. Нигматулин Р.И., Филиппов А.И., Хисматуллин А.С. Трансцилляторный перенос тепла в жидкости с газовыми пузырьками // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 5. С. 595–612.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баширов Мусса Гумерович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, earr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>

Вильданов Рауф Гибадуллович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, vildanov.rauf@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3977-046X>

Хафизов Алик Мусаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, alik_hafizov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6008-6588>

Хисматуллин Азат Салаватович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, hism5az@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6397-2278>

Акчурин Дамир Шамилович – ассистент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, akihiro177@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2174-8216>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Баширов М.Г. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования; написание статьи; составление итоговых выводов.

Вильданов Р.Г. – проведение исследований; анализ результатов и обсуждение; подготовка списка источников.

Хафизов А.М. – написание текста раздела «Методы и материалы»; графическое и табличное представление результатов исследования.

Хисматуллин А.С. – подготовка и написание текста раздела «Методы и материалы»; обработка данных.

Акчурин Д.Ш. – разработка искусственной нейронной сети; обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 07.12.2023.



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 amount 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 recent

10 years, 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 academican of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory's academic committee, and Professor Fu Zhengyi, an academican of the Chinese Academy of Engineering, is the Director of the laboratory. The laboratory is located in the Wuhan University of Technology, and it is a state key laboratory that specializes in the field of new materials. The Department of Materials Science and Engineering at the Wuhan University of Technology has been classified as a first-class State Key Discipline, included in the national "985" project of "Build a world-class discipline program," and is ranked as A+ in the fourth round of national discipline evaluation. Aiming at the global frontier research of materials science and addressing the primary national needs, this laboratory provides a world-class platform for materials compounding and preparation technology, for developing advanced composite materials for national major projects and pillar industries, and for providing support at the national strategic level. Original and systematic research results, with international impact

in transformative technologies, frontier new materials, and interdisciplinary fields, have been reported in this laboratory, and therefore, it leads the international development in several strategic frontier new materials. The laboratory fosters the development of global first-class research talent through advanced scientific research in the field of materials science and technology. In addition, the laboratory has created a culture of international collaborative innovation and has carried out "Win-Win" international cooperative research, thereby enhancing the international influence, attractiveness, and cohesion of the laboratory. The laboratory has achieved a historic breakthrough in the evaluation of the State Key laboratories in the field of materials science.

Centering on the overall vision and objectives, the laboratory focuses on the establishment and development of multi-component, multi-scale, and multi-level composite principles and material design theories that are built on core research platforms comprising material gradient composite technology, in-situ composite technology, nanocomposite technology, and their integrated innova-

tions. 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 visit-

ing 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 Interdisciplinary Materials

The new scientific journal *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) has been launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021. The first issue will be published in Jan, 2022 and the journal is free for publication in the first 3 years.

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 will include physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

Interdisciplinary Materials invites you to submit high-quality, innovative full-length research articles, rapid communications, reviews, perspectives, comments, and other editorial content of general interest to the field of interdisciplinary materials.

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 м². 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 внесен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 тыс. высокопрофессиональных специалистов. В течение последних десяти лет процент впервые трудоустроенных выпускников остается свыше 95% и составляет около 55% от всех трудоустроенных выпускников в международном рейтинге «Топ 500 компаний и новых отраслей».

На протяжении многих лет УТУ сформировал отличительную идеологию системы образования с высокими идеалами «построения отличного университета для завоевания всемирного признания и восхищения», следуя девизу «быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие – приоритетом». Университет воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию системы государственного регулирования с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

Здание корпуса научного направления «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) Уханьского технологического университета

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной про-

граммой «211 проектов для университетов» («State 211 Project for Higher Education Universities») в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты мирового уровня и научные направления мирового уровня» («World-Class University & World-Class Discipline»). Рейтинг этого направления составляет A+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№ 1 наравне с этим направлением в университетах Тцзинхуа 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 большой потребностью 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 ведущими мировыми разработчиками строительных материалов и новых материалов в 21 веке, МШМИД оценивает инновационные способности как одну из ключевых возможностей





и проводит реформирование инновационной системы подготовки кадров в рамках программы бакалавриата, магистратуры и докторантуры, а также международной программы обучения. МШМИД предлагает студентам всеобъемлющую учебную программу, которая охватывает материаловедение, естественные науки, отраслевые энергетические науки, науки об окружающей среде, информатику и изучение передовых производственных технологий. Чтобы познакомить всех студентов с международным опытом, реализуются совместные программы обучения в сотрудничестве с ведущими мировыми университетами. Кроме того, при МШМИД создано несколько платформ для всестороннего развития студентов, таких как Форум выдающихся исследователей, Международный форум по видению будущего развития, Семинар оценки качества образования, Студенческое научное общество (СНО) материаловедения Уханьского технологического университета. СНО материаловедения пять лет подряд с 2018 по 2022 год удостоивается награды Chapter of Excellence Award.

Государственная стратегическая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов (Уханьский технологический университет)

Государственная ключевая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов была утверждена Государственной комиссией планирования развития в 1987 году. После государственной инспекции она была открыта для общественности в марте 1990 года. Лаборатория нахо-

дится 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», нанокompозитную технологию и интегрированные инновации.

В настоящее время проводятся исследования пяти ключевых материалов, в том числе передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и опорных отраслей, материалов для эффективного преобразования и хранения энергии для новых энергетических технологий, нанокompозитных биоматериалов для естественных наук, информационных функциональных материалов для информационных технологий и передовых новых материалов для трансформационных технологий. Таким образом, лаборатория установила следующие пять отличительных направлений исследований: градиентная композитная технология и новые материалы, технология изготовления композитных материалов «в момент образования» и новые материалы, нанокompозитная технология и новые материалы, преобразующая технология и передовые новые материалы, а также принципы композитных материалов и дизайн материалов.

В лаборатории работает активная и инновационная исследовательская группа, состоящая в основном из молодых исследователей и исследователей среднего возраста. 100 постоянных сотрудников, в том числе 1 академик Китайской академии наук, 2 академика Китайской инженерной академии, 1 академик Королевской академии наук и искусств Бельгии, 2 академика Европейской академии наук и искусств, 1 академик Австралийской инженерно-технологической академии, 1 академик Всемирной академии керамики, 12 исследователей национального уровня, 1 главный научный сотрудник Национальной программы «973», 5 стипендиатов национального фонда «Outstanding Youth Science Fund» и 30 стипендиатов

«Национального плана поддержки талантов» и т.д. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых, которые приезжают и проводят совместные исследования по всему миру в университетах и исследовательских институтах мирового уровня. В последние годы лаборатория направила несколько выдающихся молодых ученых в международные университеты мирового уровня более чем на один год для проведения совместных исследований.

Лаборатория делает упор на глобальный академический обмен и сотрудничество. За последние пять лет мы приняли на работу 25 зарубежных ученых в качестве почетных и приглашенных профессоров в основных областях исследований с целью создания благоприятных условий работы для всемирно известных ученых и проведения совместных исследований в лаборатории.

Лаборатория наладила взаимовыгодное сотрудничество с Мичиганским университетом; Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA); Институтом материаловедения Университета Тохоку (Япония); Центром исследования материалов Оксфордского университета (Великобритания); Центром исследования композитов Калифорнийского университета (США) и Национальным институтом топливных элементов (Канада), а также с другими всемирно известными научно-исследовательскими учреждениями. Министерство науки и технологий создало «Международную совместную лабораторию передовых технологий синтеза и обработки материалов», которая является одной из первых 33 международных совместных лабораторий в Китае. Кроме того, Государственная администрация КНР по делам иностранных экспертов и Министерство образования совместно сформировали три научные базы, поддерживаемые Программой инноваций и развития талантов, а именно «Новые композитные материалы и передовые функциональные материалы», «Передовые технологии подготовки и прикладного проек-





тирования новых функциональных тонкопленочных материалов» и «Инновации и таланты для увеличения срока службы композитов». Опираясь на эти важные платформы международного сотрудничества, лаборатория осуществила несколько ключевых государственных проектов с международным сотрудничеством и добилась плодотворных результатов.

В настоящее время площадь лаборатории составляет 25 тыс. 350 м², 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 журналом *Interdisciplinary Materials*

Новый научный журнал *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) был запущен Уханьским технологическим университетом совместно с John Wiley & Sons, Inc в декабре 2021 года. Первый выпуск журнала вышел в свет в январе 2022 года, публикация в журнале бесплатная в течение первых трех лет его существования.

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.

Журнал *Interdisciplinary Materials* приглашает вас представить высококачественные, инновационные полноформатные исследовательские статьи, обзоры, точки зрения, комментарии и другой редакционный контент, представляющий общий интерес в области междисциплинарных исследований.

Контактная информация

Уханьский технологический университет

430070, Китай, провинция Хубей, г. Ухань,
район Хуншан, 122 Луоши Роуд,
Тел: 86-27-87884448; Факс: 86-27-87879466
E-mail: sklwt@whut.edu.cn
Контактные лица: Джао Сянг, Джоу Лихуа

R

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>

CC BY 4.0

Microstructural analysis of strain-resistant cement designed for well construction

Arman A. Kabdushev^{1*} , Farit A. Agzamov² , Baurzhan Zh. Manapbayev¹ , Zhangazy N. Moldamuratov^{3,4} 

¹ Taraz Regional University named after M.Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan

² Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

³ International Education Corporation, Almaty, Kazakhstan

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: arman-kz@mail.ru

ABSTRACT: Introduction. The efficiency of oil and gas well construction depends largely on the stage of casing cementing and is completed by checking the quality of its fixing by various methods, most often by geophysical methods. The necessity of high-quality cementing and ensuring the quality of technical conditions in the subsequent years of oil and gas well operation is the main task. **Materials and methods.** Microstructural features of cement slurries and cement stone were analyzed with advance methods. The essential technological properties were developed according to the requirements of GOST 1581-96 and API standards (API spec.10B). Class G cement (PCT-I-G) was used for all formulations. Polypropylene fiber and expanding additive CMA were used to increase impact resistance and to ensure tight contact with the confining surfaces of the obtained plugging stone. Microstructural analysis of the obtained cement stones and developed plugging mortars was carried out by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). **Results and discussion.** The results of the study showed that the expanding additive in tandem with polypropylene fiber works effectively to ensure the integrity of the cement ring. **Conclusion.** Microstructural analysis of plugging stones showed a tight bond between polypropylene fiber and cement stone at a concentration of – 0.25%. The expanding additive is fully hydrated and the obtained cement stone has no expansion cracks at 7 days. The developed grouts with a water-cement ratio of 0.44 showed high compressive strength.

KEYWORDS: cement slurry, cement stone, deformation, nano-additives, fibers.

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was carried out with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of scientific project No. AP09058636 «Development of cement slurries with differential properties».

FOR CITATION: Kabdushev A.A., Agzamov F.A., Manapbayev B.Zh., Moldamuratov Zh.N. Microstructural analysis of strain-resistant cement designed for well construction. *Nanotechnology in Construction*. 2023; 15(6): 564–573. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>. – EDN: WFTXGR.

INTRODUCTION

The efficiency of oil and gas well construction depends largely on the casing cementing stage and is completed by checking the quality of casing cementing by various methods, most often geophysical. Accident-free cementing and ensuring good adhesion of cement stone with casing and geological material are the main tasks of the casing cementing process. The success of several applied technologies, the safety of work in the field, and environmental protection issues regarding reliable isolation of formations proportionally depend on the techni-

cal condition of wells [1]. However, various problems appear during good operation, the main cause of which is the violation of cement ring integrity. Therefore, when developing cement slurries, it is necessary to ensure the quality of isolation and durability of the cement ring, which will be effective even after well abandonment [2, 3]. Otherwise, the consequences can be dangerous, and secondary cementing can be a high cost.

Cement ring leakage can have different causes, such as causes related to tectonic movements, which can lead to the failure of not only the integrity of the cement stone but also the casing [4]. Researchers [5] have studied the

© Kabdushev A.A., Agzamov F.A., Manapbayev B.Zh., Moldamuratov Zh.N., 2023

causes of casing deformation, which may be caused by axial loads due to reservoir drainage. Notwithstanding the causes of deformation, however, quality well cementing that ensures the integrity of the cement plug can prevent or reduce casing distortion [4, 5].

A number of authors in their works [6, 7] state that mainly pressure cycling and temperature changes lead to the occurrence of deformation of the cement plugging stone, with the results being:

- appearance of microcracks in the cement stone;
- damage to the bond between the cement stone and the casing and rock.

The above-mentioned factors should be taken into account when constructing wells under conditions of high pressures and temperatures. However, it should be noted that the factor of pressure influence on cement stone is also associated with the appearance of high loads during hydraulic fracturing and well perforation [8].

A negative effect of high temperatures on cement stone is often associated with the consolidation of steam injection wells, providing steam injection, the temperature of which can reach up to 3000°C [9]. Therefore, the product of plugging mortar hardening should be heat-resistant, otherwise, due to thermal corrosion can occur destruction of the cement stone [10, 11].

Deformation of the cement stone can also be associated with an exothermic reaction occurring during the solidification of the plugging stone, which releases a large amount of heat that affects the deformation stability of the casing [12]. The result of this reaction can be damage or crumpling of the casing, as well as the appearance of microcracks in certain intervals.

In addition to the above-mentioned causes, the tightness of the well casing is strongly affected by the disruption of the cementing process [13] and gas penetration into the cement structure while waiting wait on cement [14, 15].

Analyzing the above-mentioned reasons, it can be stated that the main factor of well casing tightness preservation is high-quality cementing due to the proper selection of cementing slurry formulation, which ensures the integrity and durability of cement stone.

Various methods are proposed to solve the problems:

- application of expanding and reinforcing additives;
- the use of nanomaterials;
- use of special additives (e.g., styrene-butadiene rubber latex) to obtain self-healing cements [16, 17, 18].

It is known that the presence of expanding additives, providing optimal expansion in the cement slurry has a positive effect on obtaining a tight contact of the plugging support with the confining surfaces.

The use of fiber has quite a wide application in various branches of construction [19]. Referring to the application of fibers in the oil and gas industry, it should be noted that at the moment quite a few types of fibers

such as organic fibers, silicon fibers, and monofilament propylene fibers have been investigated. The studies conducted in [20] showed the effectiveness of polypropylene fibers even under high pressure and temperature conditions. Hybrid fibers, which consist of calcium carbonate of 20–80 nm and carbon fibers of 700–1400 nm, were also investigated. The authors of [21] concluded that all fibers can reduce the corrosion resistance and strength of the plugging stone. However, our studies showed that the use of polypropylene fibers on the contrary increases the compressive and flexural strength of the stone. The use of reinforcing and expanding additives together increases the efficiency of the expansion process, and most importantly increases the impact resistance of the cement stone [10].

The use of nanomaterials to ensure the integrity of the plugging stone has recently been developing dynamically. The paper [6] proposes the use of polymer fibers with shape memory, on which tetraethylorthosilicate nanoparticles were deposited using the sol-gel method. Another interesting work is the reinforcement of cement slurries using polymer nanocomposite. Experimental studies included mini-emulsion polymerization and ultrasonic dispersion [4]. Also, many other studies conducted to improve the formulation of plugging solutions using nanomaterials have been quite well reported in review articles [13, 22]. However, despite the obtained favorable results, according to the authors of [13], the use of nanomaterials to improve the technological qualities of cement slurries is still not cost-effective.

Analyzing various approaches aimed at obtaining impact-resistant cement grout, it was decided to use expanding and reinforcing additives to modify plugging materials.

Regardless of the causes, cement ring failure primarily leads to gas migration, inter-column pressures, and griffin formation, which can lead to good abandonment. At the same time, many cement slurries designed to ensure the integrity of the cement plug under dynamic loads are not always resistant to gas penetration through them while waiting for cement (WOC) to harden. Gas penetration can create channels in the hardening structure of the stone, reducing the strength and impact resistance of the stone.

To solve this problem, a method of well cementing is proposed that provides curing of grouts “from top to bottom” [23, 24]. It is provided by using grouts with differential properties, differing in density and address additives, which take into account the peculiarities of the problem intervals, provide shock resistance of the cement ring, and prevent gas penetration in time of cementing [23, 24].

For experimental studies, plugging compositions were substantiated, which were tested for compliance with the requirements of GOST 1581-96 [25] and 4 formulations were obtained.

It should be noted that in many works devoted to the development of plugging systems, there are few studies of plugging stones by electron microscopy and X-ray phase analysis methods. Many researchers and producers limit themselves to checking the basic properties of cement slurries and plugging stones for compliance with the requirements of GOST 1581-96 [25].

However, to fully understand the interaction of cement hydration products with reinforcing and expanding additives, it is necessary to investigate the micro- and nano-structure by electron microscopy.

In this work, the structure, and interaction of the components of the plugging stone were investigated by scanning electron microscope (SEM). X-ray phase analysis (XRPA) was used to identify the crystalline phases of the materials.

MATERIALS AND METHODS

The research methods included scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis of the structure and crystal phase composition of plugging stones. The influence of microstructural characteristics on mechanical properties and deformation stability of materials under conditions typical for well operation was studied.

A large number of tests of the technological properties of cement mortars and the resulting stone were carried out according to GOST 1581-96 [25] and API standards (API spec.10B) [26].

Class G cement (PCT-I-G) was used in all formulations for the studies. Polypropylene fiber and expanding additive CMA produced by LLC «Cement Technologies» (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation) were used to increase impact resistance and ensure tight contact with the confining surfaces of the resulting plugging stone. There were additional additives in the slurry composition, presented in Table 1.

Table 1

Chemical reagents used for cement slurry development

Additives	Description	Functions	Concentration (of cement weight, %)
PP fiber	Polypropylene fiber	Increasing deformation resistance	0.25; 0.5
CMA (EA-CT)	Expanding additive	Creation of tight contact	2; 5
Floss	Synthetic polymer based on polyacrylamide	Reduces water release	0.2
CaCl ₂	Calcium chloride	Hardener	1%
NaCl	Sodium chloride	Hardener	1%
NMA	Nitrilotrimethylphosphonic acid	Structuralizer	0.01; 0.05

Using the above-mentioned materials according to the developed method of well cementing [23], which provides the use of cement slurries having differential properties, 4 formulations of cement slurries with various properties were substantiated and obtained (Figure 1):

Formulation 1 – W/C – 0,7; EA-CT – 5%; CaCl₂ – 1%; PP fiber – 0,5%; FLoss – 0,2%;

Formulation 2 – W/C – 0,7; EA-CT – 2%; NaCl – 1%; PP fiber – 0,25%;

Formulation 3 – W/C – 0,44; EA-CT – 5%; NMA – 0,01%; PP fiber – 0,25%; Floss – 0,2%;

Formulation 4 – W/C – 0,44; EA-CT – 5%; NMA – 0,05%; PP fiber – 0,25%.

Following the investigation of the main technological properties of cement slurries in accordance with the requirements of GOST 1581-96 and API, the obtained cement stone samples were used for microstructure study. The cement slurry hardening temperature was 22°C, hardening time was 2 and 7 days. In parallel, 2 samples of each formulation were tested and compared.

The experiments were carried out in the laboratory «Nanotechnology of Cement Systems named after Professors A.F. Polak and N.H. Karimov» of Ufa State Petroleum Technical University.

The samples were examined for microanalysis and morphological analysis of the surface by scanning electron microscope JEOL JSM-6610LV, which was equipped with an attachment energy dispersive spectrometer Oxford Inca Energy.

When studying the contact between the polypropylene fiber and the cement stone matrix, images of the specimens were obtained at magnifications up to 3300x.

The purpose of the investigation on X-ray diffractometer D2PHASER was to obtain a qualitative and quantitative analysis of the composition of curing products. Decoding of the obtained X-ray diffractograms was performed in the programs «Eva.diffraction» and «Topas.diffraction».



Fig. 1. Samples of plugging stones with different properties

RESULTS AND DISCUSSION

Investigations of the effect of water-reducing agents on the strength properties of cement plugging stone with reinforcing and expanding additives have been carried out (Table 2). These data are necessary for comparative evaluation and a complete understanding of microstructure changes in cement stone of the developed 4 formulations.

Table 2 shows that the decrease in the concentration of expanding admixture and the absence of a water-re-

ducing agent led to a decrease in the strength properties at $W/C = 0.7$.

The task of the investigation was, in addition to analyzing the cement structure, the determination of the expanding admixture, and the interaction between the matrix and polypropylene fiber.

Figure 2 shows the tight contact of polypropylene fiber and the presence of ettringite. The imaging was continued at 2500x and 3500x magnification to clarify the relationship. With a magnification of 3500x, the presence

Table 2

Results of measuring the strength characteristics of cement stone

Composition	W/C	Bending strength, MPa		Compressive strength, MPa	
		2 days	7 days	2 days	7 days
Additive-free PTC -I-G	0.44	2.9	3.8	10.8	15.4
Additive-free PTC -I-G	0.7	1.5	2.6	4.5	13.8
Formulation 1	0.7	1.97	2.95	5.53	8.7
Formulation 2	0.7	3.0	4.37	6.71	12.2
Formulation 3	0.44	3.9	5.57	17.26	More than 22
Formulation 4	0.44	3.5	5.52	13.2	More than 22

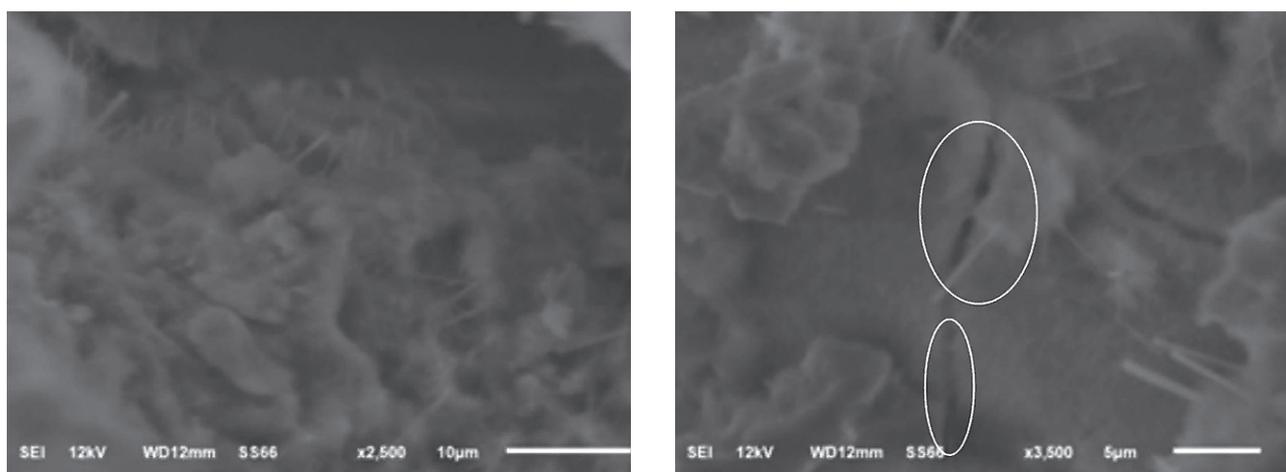


Fig. 2. Development of ettringite in the cement matrix of formulation 1 during hardening in water for 2 days ($\times 2500$ and $\times 3500$)

of cracks can be seen, which could be the reason for the reduction of the strength characteristics of the stone.

A photo of the fiber shows the interaction between cement and fiber curing products, and quantitative analysis confirms that there are cement (CaO) particles on the fiber surface (Figure 3).

The quantitative analysis of spectrum 1 shows a large amount of carbon content which means the presence of polypropylene fiber (Figure 4).

Late hydration of any expanding additive can lead to the destruction of the cement matrix of the plugging stone, but in all samples such phenomena were not detected.

At hardening of 7 days of cement stone of formulation 1, it is possible to note the increase of ettringite. It is also possible to speak about the presence of expanding additives since the core practically contains only calcium. From Figures 5 and 6 it can be concluded that all components are in close contact with each other.

Analysis of the obtained images shows a dense cement stone structure in all formulations (Fig. 7). During an investigation of the formulations (formulation 2) it is necessary to note the absence of holes or channels from polypropylene fiber. This proves that it interacts well with the cement stone, works in tension and after breaking the fibers remain in the cement stone. From the images

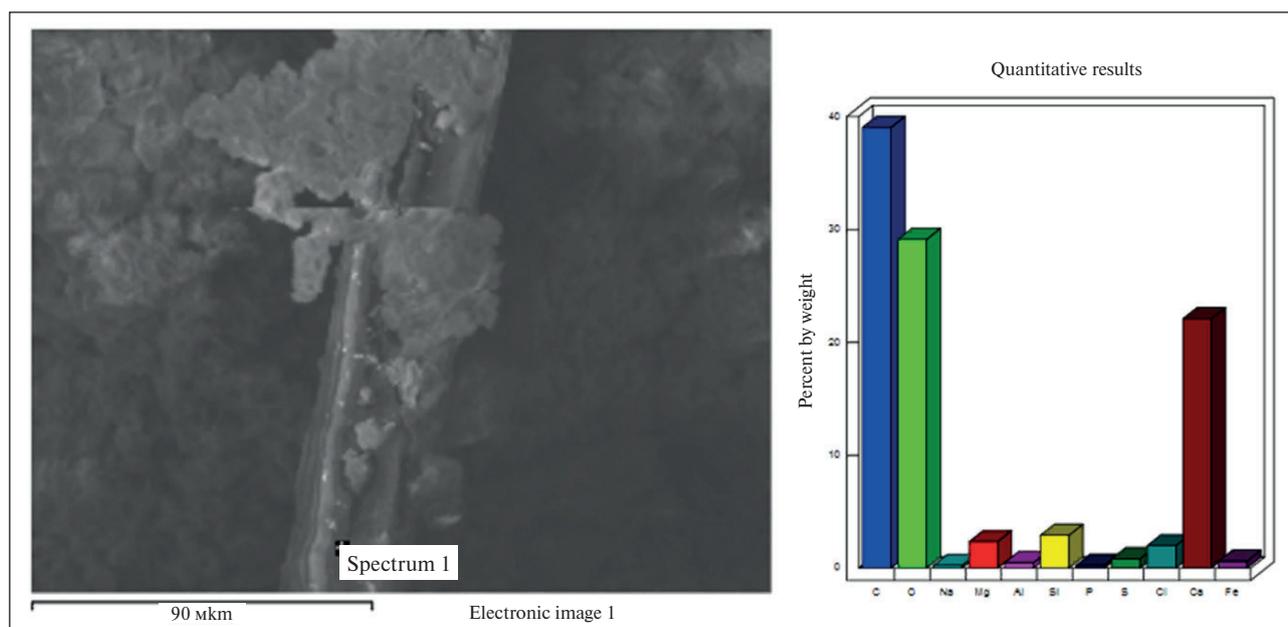


Fig. 3. Fiber image (90 µm) and elemental spectrum analysis 1

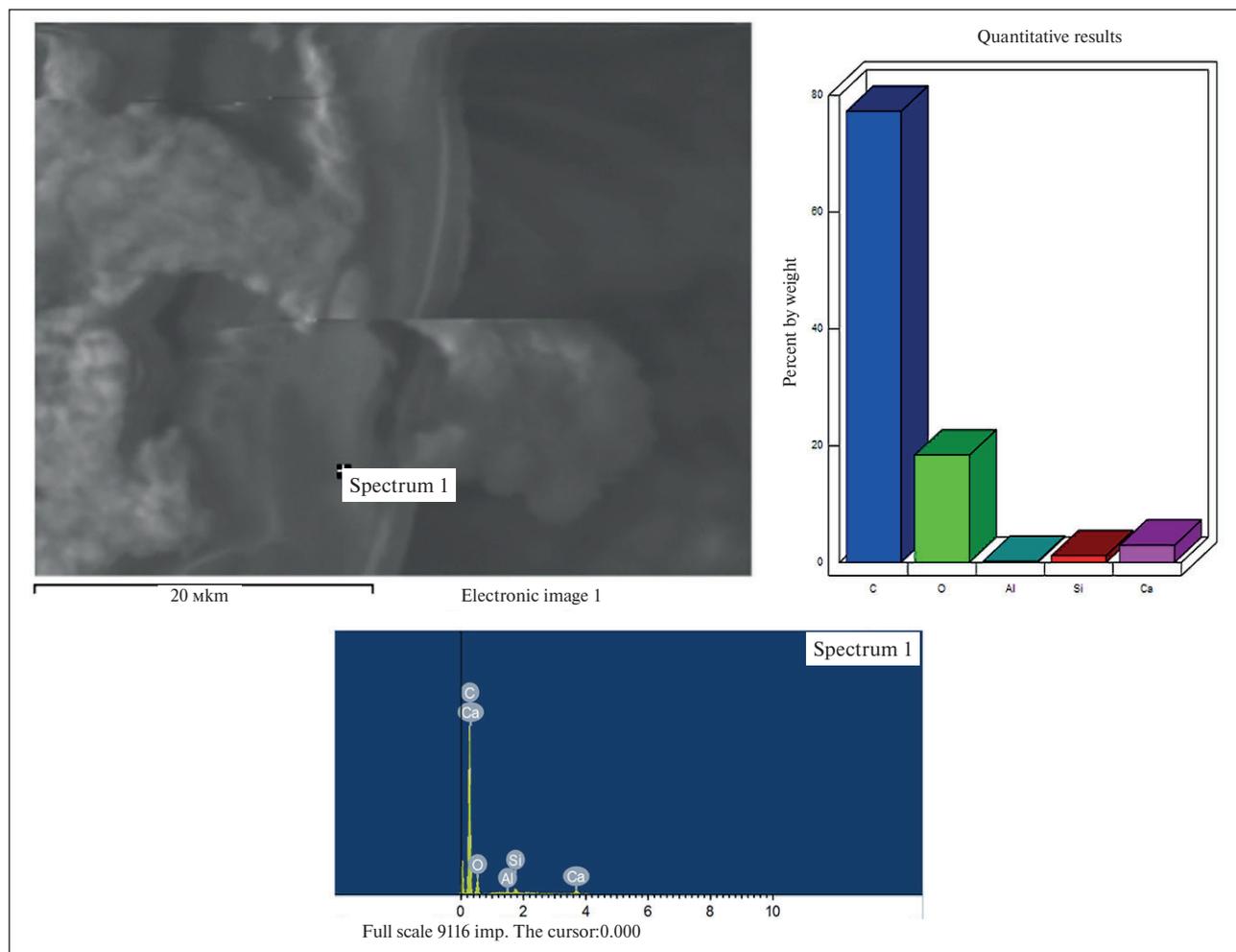


Fig. 4. Fiber image (scale 20 μm) and elemental analysis of the spectrum 1

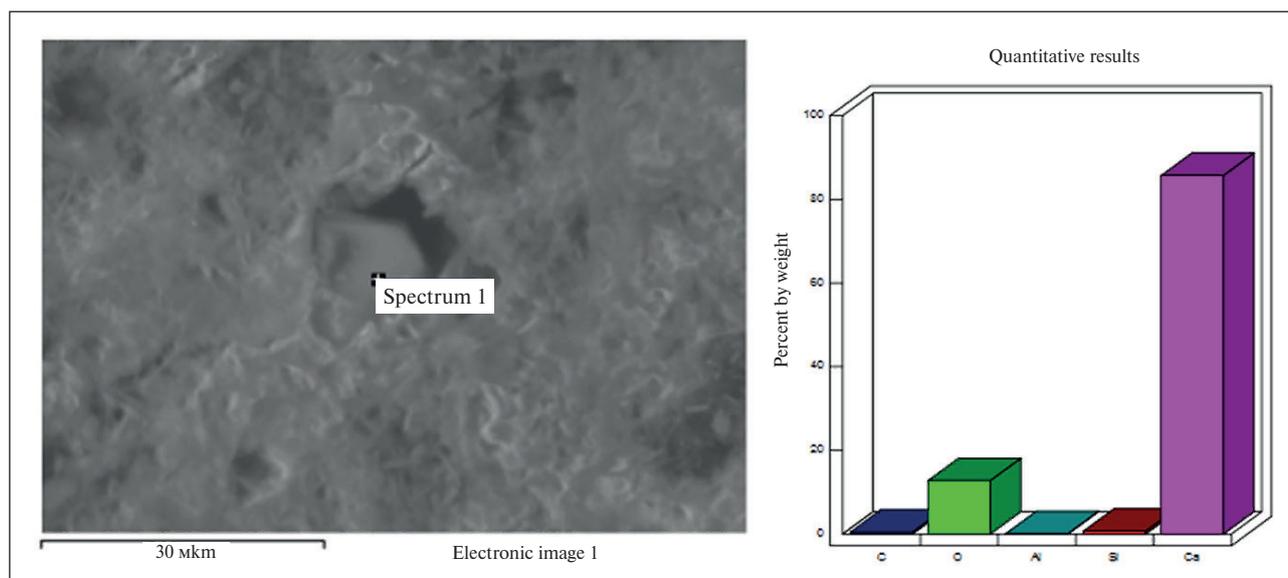


Fig. 5. Spectra of chemical elements of the investigated sample and quantitative results of formulation 1 at hardening in water for 2 days (expanding additive – CMA of “Cement Technologies” Ltd.)

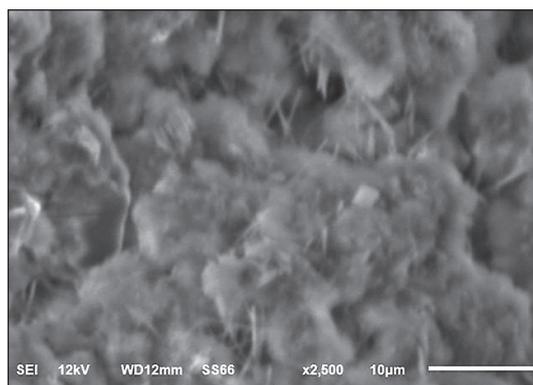
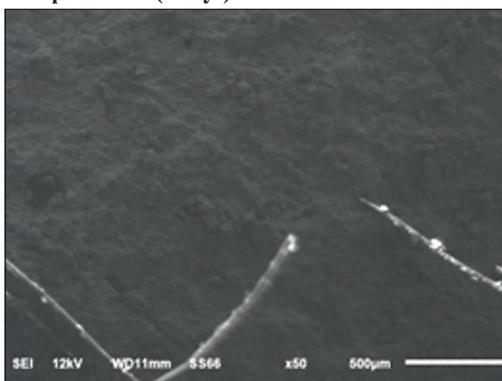
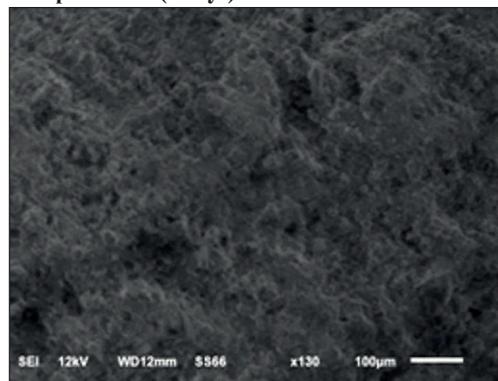


Fig. 6. Development of ettringite in cement matrix of formulation 1 during hardening in water for 7 days ($\times 2500$)

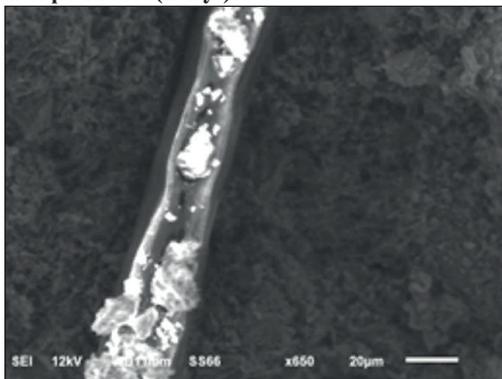
Composition 2 (2 days)



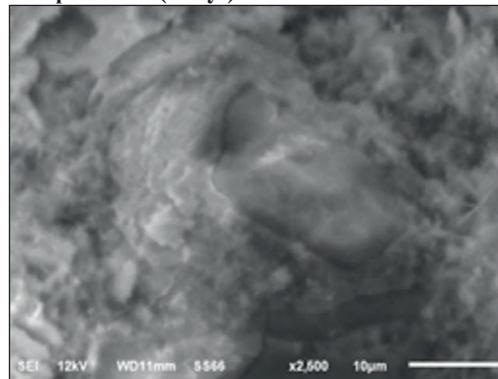
Composition 2 (7 days)



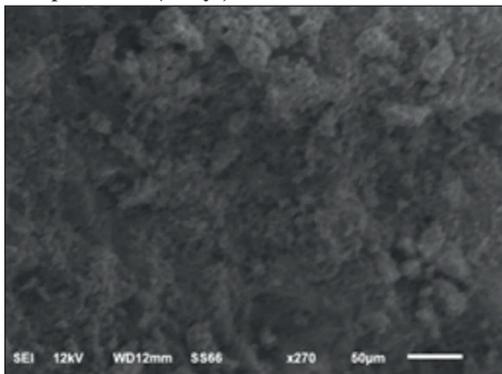
Composition 3 (2 days)



Composition 3 (7 days)



Composition 4 (2 days)



Composition 4 (7 days)

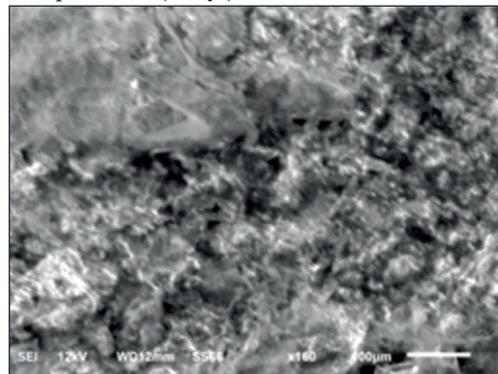


Fig. 7. Cement stone structure of formulations 2, 3, and 4 at hardening in water for 2 and 7 days

(formulations 3, 2 days), the surfaces of polypropylene fibers can be seen to have particles of cement hardening products, even after rupture. Studying formulations 2–4 showed that all the expanding admixtures are fully hydrated and have no cracks (e.g. 3 at 7 days hardening).

The results of the investigation of the plugging stone by X-ray phase analysis are shown in Figures 8 and 9.

Quantitative analysis of XRD of formulation 1, showed that when the hardening time in the water is increased from 2 days to 7 days, ettringite decreases by 3% and

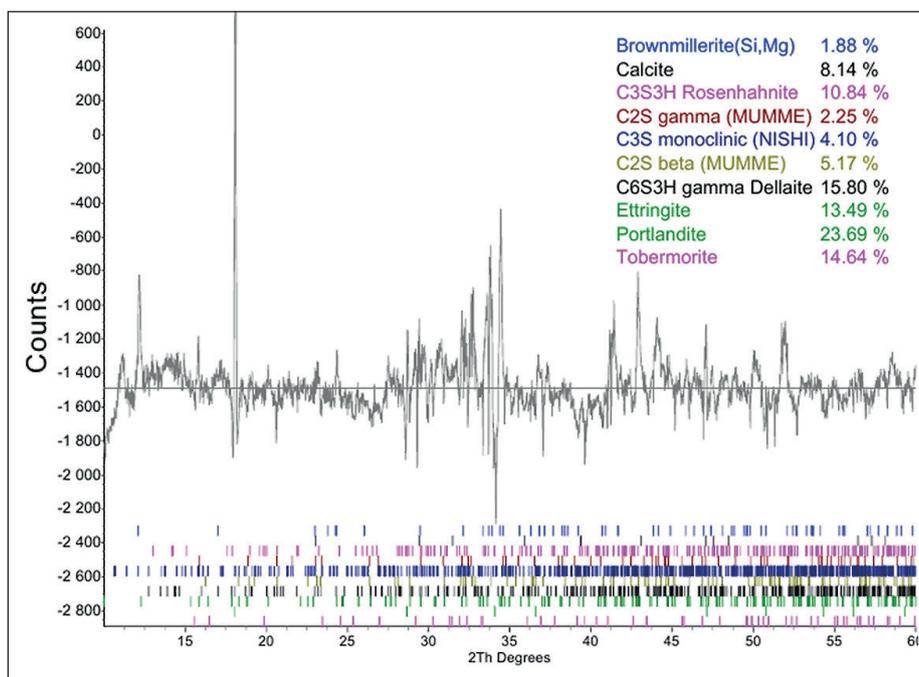


Fig. 8. Quantitative analysis of radiographs of formulation 1 when hardened in water for 2 days

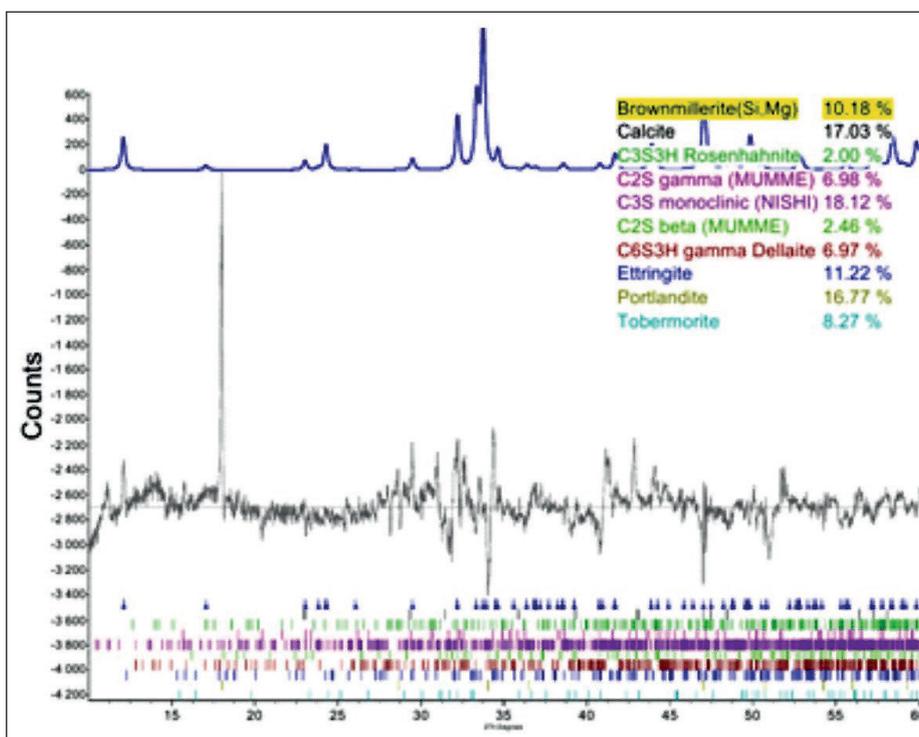


Fig. 9. Quantitative analysis of radiographs of formulation 1 at hardening in water for 7 days

amounted to 11.22%, portlandite by 7%, tobermorite by 6.37%. However, braunmillerite increases by 8.3%, calcite by 8.89%, and calcium hydrosilicate by 15.12%.

CONCLUSION

The following conclusions can be drawn based on the results of the completed investigation:

1. In all investigated formulations of cement slurries after hardening a dense contact of polypropylene fibers and cement stone is revealed, confirmed by their adhesion even after cement stone destruction.

2. The presence of dense bonds of the cement matrix, fiber, and expanding additive confirmed by electron microscopy shows new possibilities of this method in the investigation of special plugging materials.

3. The dense structure of cement stone in formulations 3 and 4 proves the role of polypropylene fiber in increasing the strength of the obtained stone.

4. Application of the XRD method allows us to trace the kinetics of hydration and phase formation of cement and modifying additives, which allows a more reasonable approach to the selection of cementing materials for wells with complex mining and geological conditions.

REFERENCES

1. Agzamov F.A., Karimov I.N., Myazhitov R.S. Theoretical bases and practice of production of plugging materials for fastening steam injection wells. *Territory Neftegaz*. 2016; 9: 26-33.
2. Agzamov F.A., Kabdushev A., Tokunova E., Manapbayev B.Z., Kozhageldi B.Z. Magnesia corrosion of grouting materials. *PeriodicoTche Quimica*. 2020; 17(34): 951-961.
3. Tupysev M.K. Deformation of casing strings as a result of technogenic deformation processes during the development of oil and gas fields. *Actual problems of oil and gas*. 2021; 2(33).
4. Buglov N.A., Butakova L.A., Shakirova E.V., Averkina E.V. Use of silicon production wastes as additives improving the process properties of the cement slurries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2022; 333(6): 122-130. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3428>
5. Ivanova T.N., Zasadzień M. Technological Capabilities of Well Cementing. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. 2021; 4(1): 465-478. <https://doi.org/10.2478/mape-2021-0042>
6. Agzamov F.A., Ismagilova E.R., Self-healing cements - the key to maintaining well casing tightness. *Nanotechnology in construction*. 2019; 11(6): 730-742. 10.15828/2075-8545-2019-11-6-730-742
7. Moldamuratov Zh.N., Iglikov A.A., Sennikov M.N., Madaliyeva E.B., Turalina M.T. Irrigation channel lining using shotcrete with additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 227-240. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240>. – EDN: BIEVUB.
8. Agzamov F.A., Grigoryev A.Yu. Modification of plugging Portland cement with nanoadditives. *Nanotechnology in construction*. 2022; 14 (4). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327>
9. Navid Yousuf, Olatunji Olayiwola, BoyuGuo, Ning Liu. A comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021; 207: 109123. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109123>
10. Christodoulou D., Lokkas P., Droudakis A., Spiliotis X., Kasiteropoulou D., Alamanis N. The Development of Practice in Permeation Grouting by Using Fine-grained Cement Suspensions. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 2021; 9(6). <https://doi.org/10.24203/ajet.v9i6.6846>
11. Liu J., Feng H., Zhang Y., Zheng K. Performance Investigation of Geopolymer Grouting Material with Varied Mix Proportions. *Sustainability (Switzerland)*. 2022; 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013046>
12. Zhu G., Zhang Q., Liu R., Bai J., Li W., Feng X. Experimental and Numerical Study on the Permeation Grouting Diffusion Mechanism Considering Filtration Effects. *Geofluids*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6613990>
13. Jia Q., Wang Y. Study on Calcium Carbonate Deposition of Microorganism Bottom Grouting to Repair Concrete Cracks. *Sustainability (Switzerland)*. 2023; 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043723>
14. Liu X., Wang D., Zhang Y., Jiang A., Fang Q., Zhang R. Analytical solutions on non-Darcy seepage of grouted and lined subsea tunnels under dynamic water levels. *Ocean Engineering*. 2023; 267. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113276>
15. Nima Mohamadian, Mohamadreza Zahedi Ramhormozi, David A. Wood, Rahman Ashena, Reinforcement of oil and gas wellbore cements with a methyl methacrylate/carbon nanotube polymer nanocomposite additive. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 103763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020>

16. Livio S., Arash D.T., Guoqiang L., Nanosilica-treated shape memory polymer fibers to strengthen wellbore cement. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021; 196: 107646. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107646>
17. Shadravan A., Schubert J., Amani M., Teodoriu C. Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation. *SPE Drilling & Completion*. 2015; 30(01): 68–75. <https://doi.org/10.2118/168321-PA>
18. Boyun Guo, Liqun Shan, Shuxian Jiang, Gao Li, Jim Lee, The maximum permissible fracturing pressure in shale gas wells for wellbore cement sheath integrity. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018; 56: 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.06.012>
19. Ramón Victor Alves Ramalho, Salete Martins Alves, Julio Cezar de Oliveira Freitas, Bruno Leonardo de Sena Costa, Ulisses Targino Bezerra. Evaluation of mechanical properties of cement slurries containing SBR latex subjected to high temperatures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 178: 787–794. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.076>
20. Shivshambhu Kumar, Achinta Bera, Subhash N. Shah. Potential applications of nanomaterials in oil and gas well cementing: Current status, challenges and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022; 213: 110395. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110395>
21. Zhao L., Li N., Yang J., Wang H., Zheng L., Wang C. Alkali-Resistant and pH-Sensitive Water Absorbent Self-Healing Materials Suitable for Oil Well Cement. *Energies*. 2022; 15: 7630. <https://doi.org/10.3390/en15207630>
22. Lian J., Yue J., Xing X., Wu Z. Design and Evaluation of the Elastic and Anti-Corrosion Cement Slurry for Carbon Dioxide Storage. *Energies*. 2023; 16: 435. <https://doi.org/10.3390/en16010435>
23. Moldamuratov Zh.N., Ussenkulov Zh.A., Yeskermessov Zh.E., Shanshabayev N.A., Bapanova Zh.Zh., Nogaibekova M.T., Joldassov S.K. Experimental study of the effect of surfactants and water-cement ratio on abrasion resistance of hydraulic concretes. *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2023; 16(3): 1116–1126. <http://doi.org/10.31788/RJC.2023.1638391>
24. Moldamuratov Zh.N., Imambayeva R.S., Imambaev N.S., Iglikov A.A., Tattibayev S.Zh. Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(4): 306–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318>
25. Interstate standard GOST 1581-96 «Portland cement plugging. Technical conditions».
26. *API spec. 10B Recommended Practice for Testing Well Cements*.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Arman A. Kabdushev – Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of “Petroleum and Mining Engineering”, Taraz Regional University named after M.Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan, arman-kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3579-9054>

Farit A. Agzamov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Bashkortostan, Russian Federation, faritag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5850-5261>

Baurzhan Zh. Manapbayev – Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, the Department of “Petroleum and Mining Engineering”, Taraz Regional University named after M.Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan, jiboj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9140-178X>

Zhangazy N. Moldamuratov – Ph.D., Research Professor, Faculty of General Construction, International Education Corporation, Almaty, Kazakhstan, zhanga_m_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Arman A. Kabdushev – scientific supervision; investigation concept; development of methodology; scientific editing of the text; final conclusions.

Farit A. Agzamov – article writing, scientific editing of the text, identification of dependencies.

Baurzhan Zh. Manapbayev – preparation of samples, writing of the article, processing of experimental data; and accumulation of material.

Zhangazy N. Moldamuratov – setting of computational problems, analysis of investigation results.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 20.11.2023.

Научная статья

УДК 622.245.422.4

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>

CC BY 4.0

Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин

Арман Арстангалиевич Кабдушев^{1*} , Фарит Акрамович Агзамов² ,
Бауыржан Жарканбекович Манапбаев¹ , Жангазы Нуржанович Молдамуратов^{3,4} 

¹ Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

³ Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Эффективность строительства нефтяных и газовых скважин во многом зависит от этапа цементирования обсадных колонн и завершается проверкой качества их крепления различными методами, чаще всего геофизическими. Необходимость качественного цементирования и обеспечение качества технического состояния в последующие годы эксплуатации нефтяных и газовых скважин является основной задачей. **Методы и материалы.** Выполнен анализ микроструктурных особенностей тампонажных растворов и цементного камня с использованием современных методов. Основные технологические свойства были разработаны согласно требованиям ГОСТ 1581-96 и стандартам API (API spec.10B). При исследовании всех рецептур применялся цемент класса G (ПЦТ-I-G). Для повышения удароустойчивости и обеспечения плотного контакта с ограничивающими поверхностями получаемого тампонажного камня были использованы полипропиленовая фибра и расширяющая добавка КМД. Микроструктурный анализ полученных цементных камней и разработанных тампонажных растворов проводился методом рентгенофазового аппарата (РФА) и растрового электронного микроскопа (SEM). **Результаты и обсуждение.** Результаты исследования показали, что расширяющая добавка в тандеме с полипропиленовым волокном эффективно работает на обеспечение целостности цементного кольца. **Заключение и выводы.** Микроструктурный анализ тампонажных камней показал плотную связь полипропиленовой фибры и цементного камня при концентрации 0,25%. Расширяющая добавка полностью гидратирована, и полученный цементный камень не имеет трещин от расширений при 7 сутках. Разработанные тампонажные растворы с водоцементным отношением 0,44 показали высокую прочность на сжатие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тампонажный раствор, цементный камень, деформация, нанодобавки, фибры.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP09058636 «Разработка тампонажных растворов с дифференциальными свойствами».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н. Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 6. С. 564–573. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>. – EDN: WFTXGR.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность строительства нефтяных и газовых скважин во многом зависит от этапа цементирования обсадных колонн и завершается проверкой качества их крепления различными методами, чаще всего геофизическими. Безаварийное цемен-

тирование и обеспечение хорошей адгезии цементного камня с обсадной колонной и горной породой являются основными задачами процесса цементирования обсадной колонны. Успешность многих применяемых технологий, обеспечение безопасности работы на месторождении, вопросы охраны окружающей среды относительно надежной изоляции

© Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н., 2023

пластов пропорционально зависит от технического состояния скважин [1]. Однако при эксплуатации скважин появляются различные проблемы, основной причиной которых является нарушение целостности цементного кольца. Поэтому при разработке тампонажных растворов необходимо обеспечить качество изоляции и долговечность цементного камня, который будет эффективным даже после ликвидации скважин [2, 3]. В противном случае последствия могут быть опасными, а вторичное цементование может привести к большим затратам.

Нарушение герметичности цементного кольца может иметь разные причины, например, причины, связанные с тектоническими движениями, которые могут приводить к разрушению не только целостности цементного камня, но и обсадной колонны [4]. Исследователями [5] изучались причины деформации обсадных колонн, которые могут быть вызваны осевыми нагрузками, возникающими из-за дренирования коллектора. Однако, независимо от причин деформации, качественное цементование скважин, обеспечивающее целостность тампонажного камня, может предотвратить или снизить искривление обсадной колонны [4, 5].

Ряд авторов в своих работах [6, 7] утверждает, что главным образом цикличность давления и изменение температуры приводят к возникновению деформации тампонажного камня, результатами которых являются:

- появление микротрещин в цементном камне;
- повреждение сцепления цементного камня с обсадной колонной и горной породой.

Выше представленные факторы должны быть учтены при строительстве скважин в условиях высоких давлений и температур. Однако необходимо отметить, что фактор влияния давления на цементный камень также связан с появлением высоких нагрузок при гидравлическом разрыве пласта и перфорации скважин [8].

Отрицательное влияние высоких температур на тампонажный камень часто связано с креплением паронагнетательных скважин, предусматривающим закачку пара, температура которого может достигать 300°C [9]. Поэтому продукт твердения тампонажного раствора должен быть термостойким, в противном случае из-за термической коррозии может возникнуть деструкция тампонажного камня [10, 11].

Деформация цементного камня может быть связана и с экзотермической реакцией, происходящей при твердении тампонажного камня, во время которой выделяется большое количество тепла, влияющее на деформационную устойчивость обсадной колонны [12]. Результатом данной реакции может быть повреждение или смятие обсадной колонны, а также появление микротрещин в определенных интервалах.

Кроме вышеуказанных причин герметичность крепи скважины сильно зависит от нарушения процесса цементирования [13] и проникновения газа в структуру цементного камня во время ожидания затвердения цемента [14, 15].

Анализируя вышеуказанные причины, можно утверждать, что главным фактором сохранения герметичности крепи скважины является качественное цементование за счет правильного подбора рецептуры тампонажного раствора, обеспечивающее целостность и долговечность цементного камня.

Для решения задач предлагаются различные методы:

- применение расширяющих и армирующих добавок;
- применение наноматериалов;
- использование специальных добавок (например, как стирен-бутадиен резина латекс) для получения самозалечивающихся цементов [16, 17, 18].

Известно, что наличие расширяющих добавок, обеспечивающее оптимальное расширение в тампонажном растворе, положительно влияет на получение плотного контакта тампонажной крепи с ограничивающими поверхностями.

Использование фибры имеет довольно широкое применение в различных отраслях строительства [19]. Относительно применения фибры в нефтегазовой отрасли необходимо отметить, что на данный момент исследовано достаточно много видов волокон, таких, как органические фибры, кремниевые волокна, моноволоконистые пропиленовые волокна. Проведенные исследования в работе [20] показали эффективность полипропиленовых фибр даже при условиях высокого давления и высоких температур. Также были исследованы гибридные фибры, которые состоят из карбоната кальция размером 20–80 нм и углеродных волокон размером 700–1400 нм. Авторы работы [21] пришли к выводу, что все фибры могут снижать коррозионную стойкость и прочность тампонажного камня. Однако наши исследования показали, что использование полипропиленовых фибр, наоборот, увеличивает прочность камня при сжатии и изгибе. Использование армирующих и расширяющих добавок вместе увеличивает эффективность процесса расширения и, самое главное, увеличивает удароустойчивость тампонажного камня [10].

Применение наноматериалов для обеспечения целостности тампонажного камня в последнее время развивается динамично. В работе [6] предлагается использование полимерных волокон с памятью формы, на которых были нанесены наночастицы тетраэтилортосиликата с помощью золь-гель способа. Другой интересной работой является армирование тампонажных растворов с применением полимерного нанокompозита. Экспериментальные

исследования включали миниэмульсионную полимеризацию и ультразвуковую дисперсию [4]. Также многие другие проведенные исследования по совершенствованию рецептуры тампонажных растворов с применением наноматериалов были достаточно хорошо отражены в обзорных статьях [13, 22]. Однако, несмотря на полученные благоприятные результаты, по мнению авторов работы [13], использование наноматериалов для улучшения технологических качеств тампонажных растворов все еще является экономически не эффективными.

Анализируя различные подходы, направленные на получение удароустойчивого тампонажного камня, было решено использовать расширяющие и армирующие добавки для модификации тампонажных материалов.

Независимо от причин разрушение цементного кольца приводит, в первую очередь, к миграции газа, межколонным давлениям, образованию грифонов, что может привести к ликвидации скважины. При этом многие тампонажные растворы, направленные на обеспечение целостности тампонажного камня при динамических нагрузках, не всегда устойчивы к газопорыву через них во время ожидания затвердения цемента (ОЗЦ). Проникновение газа может создать каналы в твердеющей структуре камня, снижающие прочность и удароустойчивость камня.

Для решения данной задачи предложен метод цементирования скважин, обеспечивающий твердение растворов «сверху-вниз» [23, 24]. Это обеспечивается использованием растворов с дифференциальными свойствами, отличающихся плотностью и адресными добавками, которые учитывают особенности проблемных интервалов, обеспечивают удароустойчивость цементного кольца и препятствуют проникновению газа во время ОЗЦ [23, 24].

Для экспериментальных исследований были обособлены тампонажные составы, которые тестировались на соответствие требованиям ГОСТ 1581-96 [25], и получены 4 рецептуры.

Следует отметить, что во многих работах, посвященных разработке тампонажных систем, мало представлены исследования тампонажного камня методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Многие исследователи и производственники ограничиваются проверкой основных свойств тампонажных растворов и камня на соответствие требованиям ГОСТ 1581-96 [25].

Однако, для полного понимания взаимодействия продуктов гидратации цемента с армирующими и расширяющими добавками, необходимо исследовать микро- и наноструктуру электронной микроскопией.

В данной работе исследовались структура, взаимодействие компонентов тампонажного камня

растворным электронным микроскопом (РЭМ). Для идентификации кристаллических фаз материалов применялся рентгенофазовый анализ (РФА).

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методы исследования включали в себя сканирующую электронную микроскопию, рентгеноструктурный анализ структуры и кристаллической фазовой композиции тампонажных камней. Изучались влияние микроструктурных характеристик на механические свойства и деформационную устойчивость материалов при условиях, характерных для эксплуатации скважин.

Проведено большое количество испытаний технологических свойств цементных растворов и полученного камня согласно ГОСТ 1581-96 [25] и стандартам API (API spec. 10B) [26].

Для исследований во всех рецептурах использовался цемент класса G (ПЦТ-I-G). Для повышения удароустойчивости и обеспечения плотного контакта с ограничивающими поверхностями получаемого тампонажного камня были использованы полипропиленовая фибра и расширяющая добавка КМД, выпускаемая ООО «Цементные технологии» (Уфа, Республика Башкортостан, РФ). В составе растворов имелись дополнительные добавки, представленные в табл. 1.

Используя вышеуказанные материалы, согласно разработанному методу цементирования скважин [23], который предусматривает использование тампонажных растворов с дифференциальными свойствами, были обоснованы и получены 4 рецептуры тампонажных растворов, имеющие различные свойства (рис. 1):

Рецептура 1 – В/Ц – 0,7; РД-ЦТ – 5%; CaCl_2 – 1%; Фибра ПП – 0,5%; FLoss – 0,2%;

Рецептура 2 – В/Ц – 0,7; РД-ЦТ – 2%; NaCl – 1%; Фибра ПП – 0,25%;

Рецептура 3 – В/Ц – 0,44; РД-ЦТ – 5%; НТФ – 0,01%; Фибра ПП – 0,25%; Floss – 0,2%;

Рецептура 4 – В/Ц – 0,44; РД-ЦТ – 5%; НТФ – 0,05%; Фибра ПП – 0,25%.

После исследования основных технологических свойств тампонажных растворов в соответствии с требованием ГОСТ 1581-96 и API полученные образцы цементного камня были использованы для изучения микроструктуры. Температура твердения цементного раствора 22°C, время твердения 2 и 7 суток. Параллельно испытывалось и сравнивалось по 2 образца каждой рецептуры.

Эксперименты проводились в лаборатории «Нанотехнология цементных систем имени профессоров А.Ф. Полака и Н.Х. Каримова» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Таблица 1

Химические реагенты, используемые для разработки тампонажного раствора

Добавки	Описание	Функции	Концентрация (от веса цемента, %)
Фибра ПП	Полипропиленовая фибра	Увеличение деформационной устойчивости	0,25; 0,5
МКД (РД-ЦТ)	Расширяющая добавка	Создание плотного контакта	2; 5
Floss	Синтетический полимер на основе полиакриламида	Понизитель водоотдачи	0,2
CaCl ₂	Хлорид кальция	Ускоритель схватывания	1%
NaCl	Хлорид натрия	Ускоритель схватывания	1%
НТФ	Нитрилотриметилфосфоновая кислота	Структурообразователь	0,01; 0,05



Рис. 1. Образцы тампонажных камней с различными свойствами

Образцы были исследованы на микроанализ и морфологический анализ поверхности растровым электронным микроскопом JEOL JSM-6610LV, который был оборудован приставкой энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca Energy.

При изучении контакта полипропиленовой фибры и матрицы цементного камня были получены снимки образцов с увеличением до 3300 раз.

Целью исследования на рентгеновском дифрактомере D2PHASER являлось получение качественного

и количественного анализа состава продуктов твердения. Расшифровка полученных рентгенограмм производилась в программах «Eva.diffraction» и «Topas.diffraction».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены исследования влияния понизителей водоотдачи на прочностные свойства тампонажного камня с армирующей и расширяющей добавкой (табл. 2). Эти данные необходимы для сравнительной оценки и полного понимания изменений микроструктуры в цементном камне разработанных 4-х рецептур.

Из табл. 2 видно, снижение концентрации расширяющей добавки и отсутствие понизителя водоотдачи привели к снижению прочностных характеристик при В/Ц = 0,7.

Задачей исследования было, кроме анализа структуры цемента, определение расширяющей добавки, взаимодействие матрицы с полипропиленовой фиброй.

На рис. 2 показан плотный контакт полипропиленовой фибры и наличие этtringита. Для уточнения

взаимосвязи съемки были продолжены при увеличении в 2500 раз и в 3500 раз. С увеличением в 3500 раз видно наличие трещин, которые могли быть причиной снижения прочностных характеристик камня.

Снимок фибры показывает взаимодействие продуктов твердения цемента и фибры, а количественный анализ подтверждает, что на поверхности фибры имеются частицы цемента (CaO) (рис. 3).

Количественный анализ спектра 1 показывает на большое количество содержания углерода, который означает наличие полипропиленовой фибры (рис. 4).

Поздняя гидратация любой расширяющей добавки может привести к разрушению цементной матрицы тампонажного камня, однако во всех образцах такие явления не были выявлены.

При твердении 7 суток цементного камня рецептуры 1 можно отметить увеличение этtringита. Также можно говорить и о наличии расширяющей добавки, поскольку ядро практически содержит только кальций. Из рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что все компоненты находятся в тесном контакте друг с другом.

Таблица 2

Результаты измерения прочностных характеристик цементного камня

Состав	В/Ц	Предел прочности на изгиб, МПа		Предел прочности на сжатие, МПа	
		2 сут	7 сут	2 сут	7 сут
Бездобавочный ПТЦ-I-G	0,44	2,9	3,8	10,8	15,4
Бездобавочный ПТЦ-I-G	0,7	1,5	2,6	4,5	13,8
Рецептура 1	0,7	1,97	2,95	5,53	8,7
Рецептура 2	0,7	3,0	4,37	6,71	12,2
Рецептура 3	0,44	3,9	5,57	17,26	Более 22
Рецептура 4	0,44	3,5	5,52	13,2	Более 22

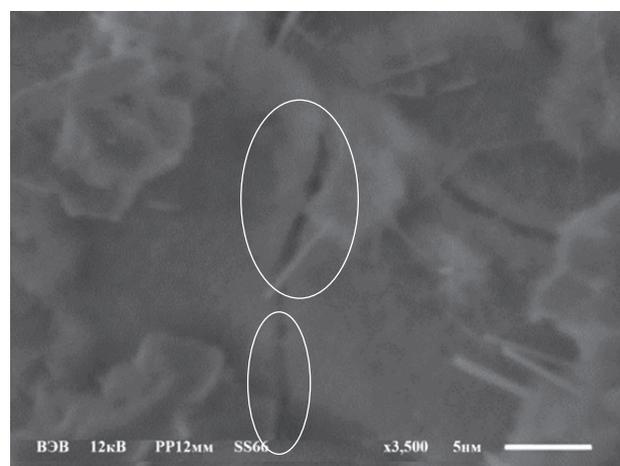
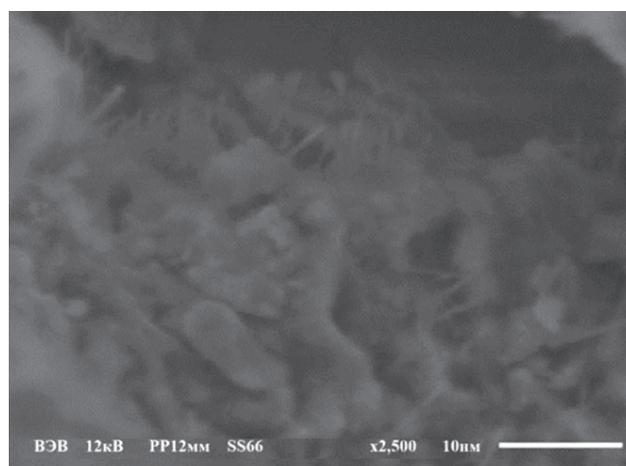


Рис. 2. Развитие этtringита в цементной матрице рецептуры 1 при твердении в воде 2 суток (×2500 и ×3500)

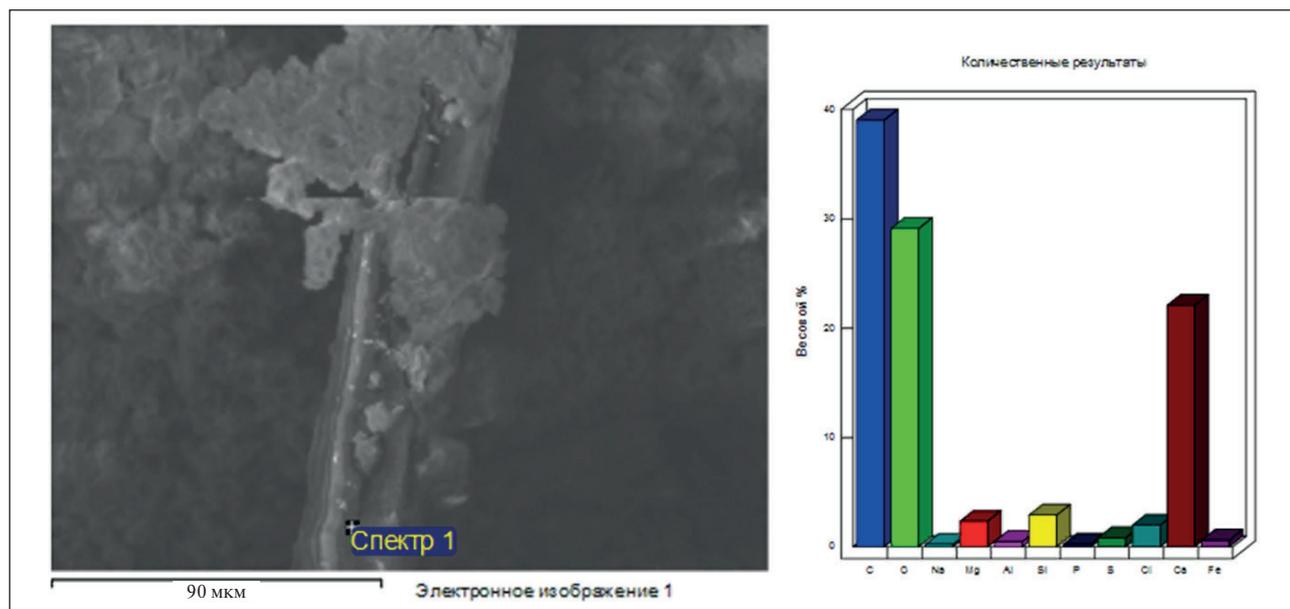


Рис. 3. Снимок фибры (90 мкм) и элементный анализ спектра 1

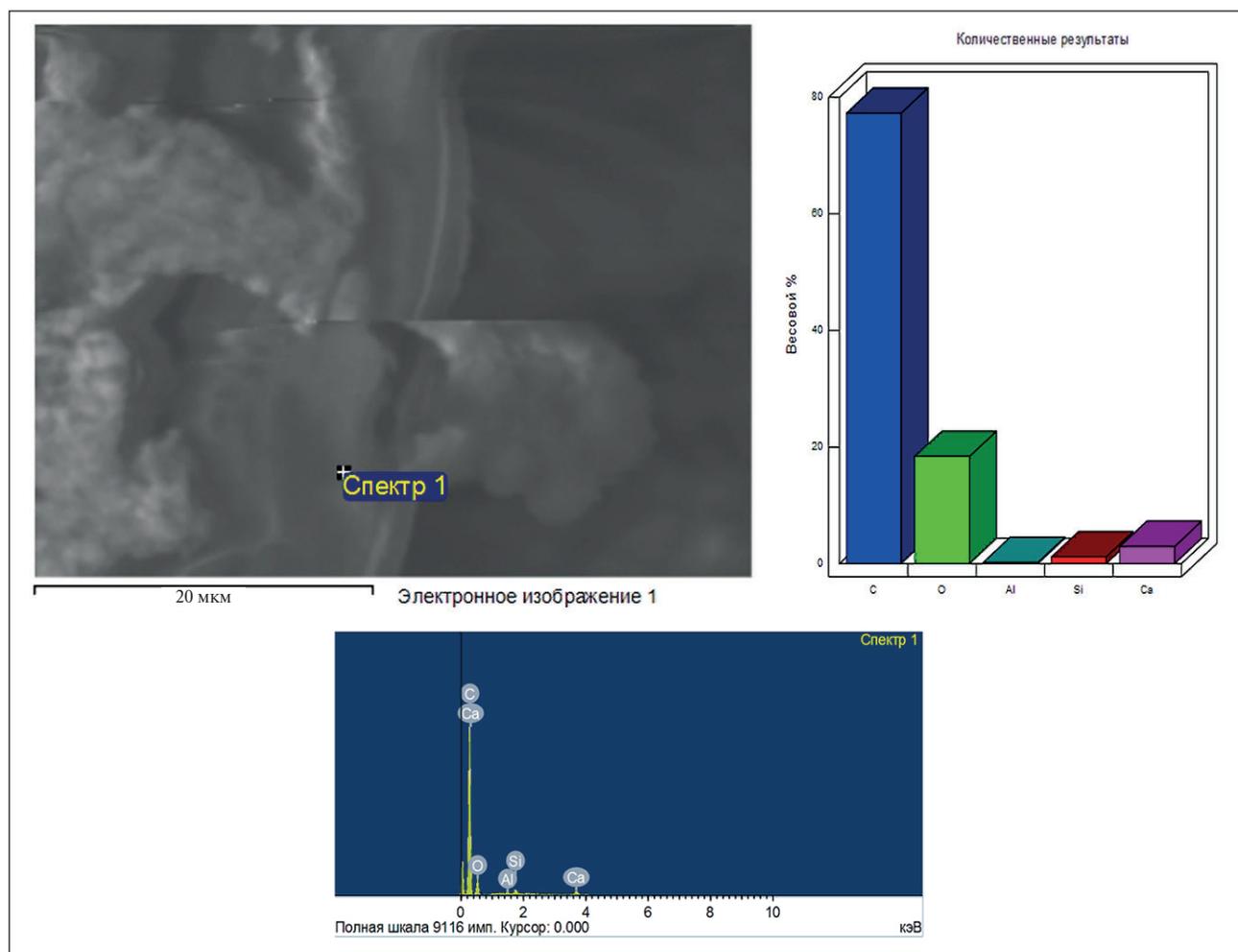


Рис. 4. Снимок фибры (масштаб 20 мкм) и элементный анализ спектра 1

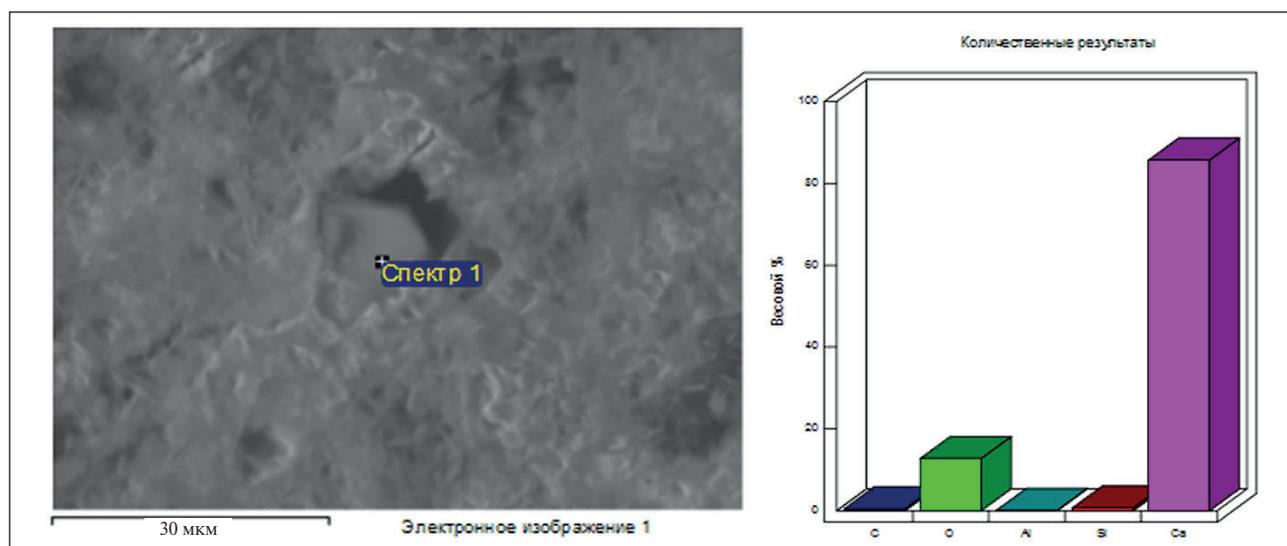


Рис. 5. Спектры химических элементов исследуемого образца и количественные результаты рецептуры 1 при твердении в воде 2 суток (расширяющая добавка – КМД ООО «Цементные технологии»)

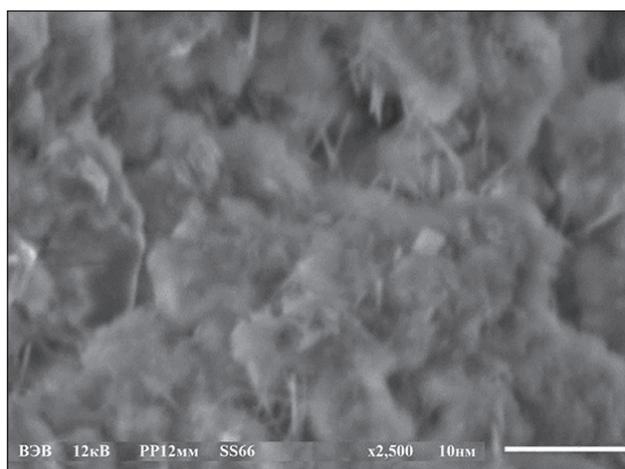


Рис. 6. Развитие этtringита в цементной матрице рецептуры 1 при твердении в воде 7 суток ($\times 2500$)

Анализ полученных снимков показывает плотную структуру цементного камня во всех рецептурах (рис. 7). При исследовании рецептов (рецептура 2) необходимо отметить отсутствие отверстий или каналов от полипропиленовой фибры. Это доказывает, что она хорошо взаимодействует с цементным камнем, работает на растяжение, а после разрыва волокна остается в цементном камне. Из снимков (рецептуры 3, 2 суток) видны поверхности полипропиленовых фибр, которые имеют частицы продуктов твердения цемента даже после разрыва. Исследование рецептов 2–4 показало, что все расширяющие добавки полностью гидратированы и не имеют трещин (например, 3 при твердении 7 суток).

Результаты исследования тампонажного камня методом рентгенофазового анализа показаны на рис. 8 и 9.

Количественный анализ рентгенограммы рецептуры 1, который показал, что при увеличении времени твердения в воде от 2 до 7 суток этtringит уменьшается на 3% и составляет 11,22%, портландит на 7%, тоберморит на 6,37%. Однако увеличивается браунмиллерит 8,3%, кальцит на 8,89%, гидросиликат кальция на 15,12%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Во всех исследованных рецептурах тампонажных растворов после твердения выявлен плотный контакт полипропиленовой фибры и цементного камня, подтвержденный их прилипанием даже после разрушения цементного камня.

2. Наличие плотной связи цементной матрицы, фибры и расширяющей добавки, подтвержденное методом электронной микроскопии, показывает новые возможности данного метода при исследовании специальных тампонажных материалов.

3. Плотная структура цементного камня в рецептурах 3 и 4 доказывает роль полипропиленовой фибры в увеличении прочности получаемого камня.

4. Применение метода РФА позволяет проследить кинетику гидратации и фазообразование цемента и модифицирующих добавок, что позволит более обоснованно подходить к подбору состава тампонажных материалов для скважин со сложными горно-геологическими условиями.

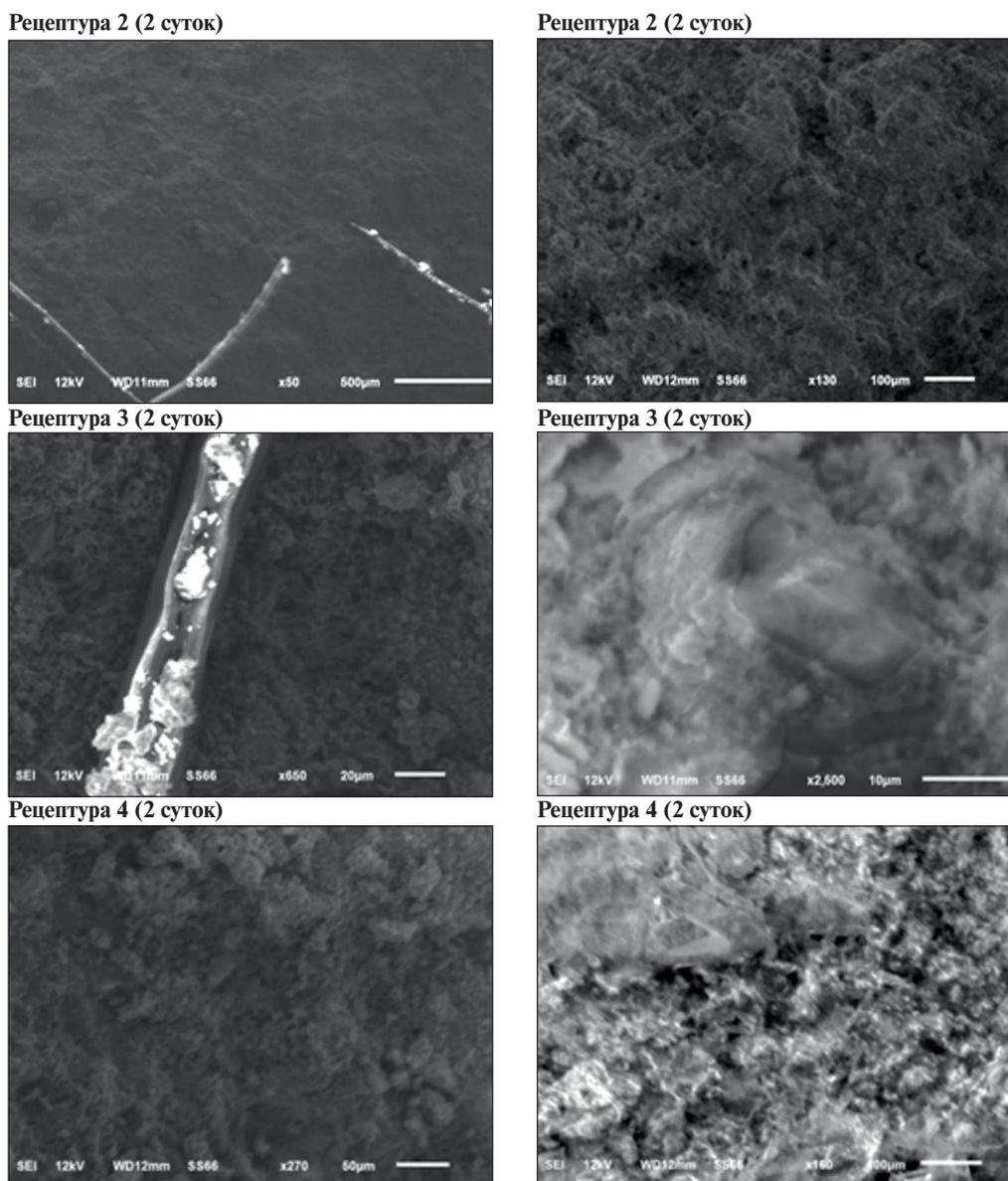


Рис. 7. Структура цементного камня рецептуры 2, 3, 4 при твердении в воде 2 и 7 суток

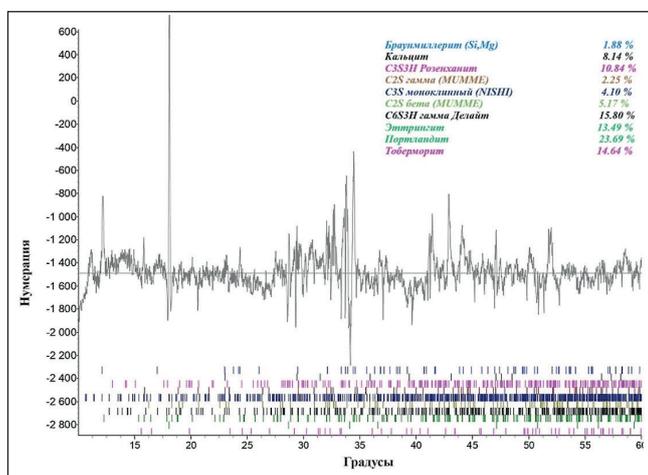


Рис. 8. Количественный анализ рентгенограммы рецептуры 1 при твердении в воде 2 суток

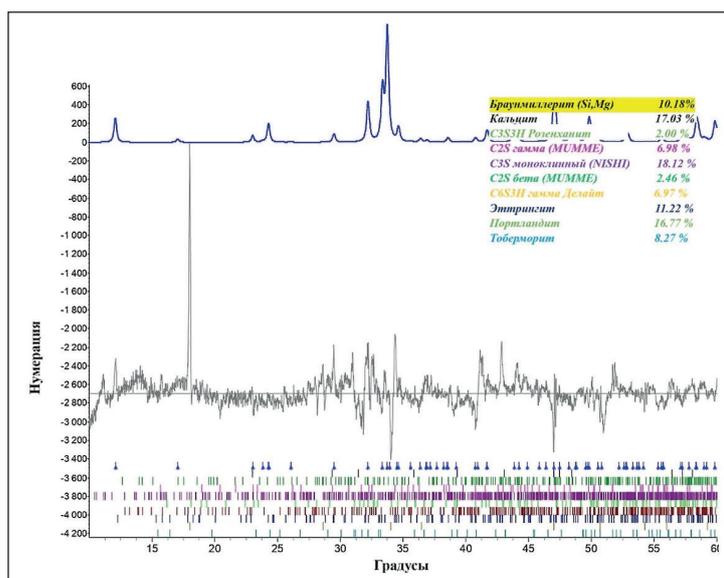


Рис. 9. Количественный анализ рентгенограммы рецептуры 1 при твердении в воде 7 суток

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агзамов Ф.А., Каримов И.Н., Мяжитов Р.С. Теоретические основы и практика получения тампонажных материалов для крепления паронагнетательных скважин. Территория Нефтегаз. 2016. 9. 26–33.
2. Agzamov F.A., Kabdushev A., Tokunova E., Manapbayev B.Z., Kozhageldi B.Z. Magnesia corrosion of grouting materials. *PeriodicoTche Quimica*. 2020; 17(34): 951-961.
3. Тупысев М.К. Деформация обсадных колонн в результате проявления техногенных деформационных процессов при разработке нефтегазовых месторождений. Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. 2(33).
4. Buglov N.A., Butakova L.A., Shakirova E.V., Averkina E.V. Use of silicon production wastes as additives improving the process properties of the cement slurries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2022; 333(6): 122-130. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3428>
5. Ivanova T.N., Zasadzień M. Technological Capabilities of Well Cementing. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. 2021; 4(1): 465-478. <https://doi.org/10.2478/mape-2021-0042>
6. Агзамов Ф.А., Исмагилова Э.Р., Самозалечивающиеся цементы – ключ к сохранению герметичности крепи скважин. *Нанотехнологии в строительстве*. 2019. 11(6). 730-742. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-6-730-742>
7. Молдамуратов Ж.Н., Игликов А.А., Сенников М.Н., Мадалиева Э.Б., Туралина М.Т. Торкрет бетон с добавками для облицовки оросительных каналов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. 14 (3). 227-240. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240>
8. Агзамов Ф.А., Григорьев А.Ю. Модификация тампонажного портландцемента нанодобавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. 14 (4). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327>
9. Navid Yousuf, Olatunji Olayiwola, BoyuGuo, Ning Liu. A comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021; 207: 109123. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109123>
10. Christodoulou D., Lokkas P., Droudakis A., Spiliotis X., Kasiteropoulou D., Alamanis N. The Development of Practice in Permeation Grouting by Using Fine-grained Cement Suspensions. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 2021; 9(6). <https://doi.org/10.24203/ajet.v9i6.6846>
11. Liu J., Feng H., Zhang Y., Zheng K. Performance Investigation of Geopolymer Grouting Material with Varied Mix Proportions. *Sustainability (Switzerland)*. 2022; 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013046>
12. Zhu G., Zhang Q., Liu R., Bai J., Li W., Feng X. Experimental and Numerical Study on the Permeation Grouting Diffusion Mechanism Considering Filtration Effects. *Geofluids*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6613990>
13. Jia Q., Wang Y. Study on Calcium Carbonate Deposition of Microorganism Bottom Grouting to Repair Concrete Cracks. *Sustainability (Switzerland)*. 2023; 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043723>

14. Liu X., Wang D., Zhang Y., Jiang A., Fang Q., Zhang R. Analytical solutions on non-Darcy seepage of grouted and lined subsea tunnels under dynamic water levels. *Ocean Engineering*. 2023; 267. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113276>
15. Nima Mohamadian, Mohamadreza Zahedi Ramhormozi, David A. Wood, Rahman Ashena, Reinforcement of oil and gas wellbore cements with a methyl methacrylate/carbon nanotube polymer nanocomposite additive. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 103763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103763>
16. Livio S., Arash D.T., Guoqiang L., Nanosilica-treated shape memory polymer fibers to strengthen wellbore cement. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021; 196: 107646. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107646>
17. Shadravan A., Schubert J., Amani M., Teodoriu C. Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation. *SPE Drilling & Completion*. 2015; 30(01): 68–75. <https://doi.org/10.2118/168321-PA>
18. Boyun Guo, Liqun Shan, Shuxian Jiang, Gao Li, Jim Lee, The maximum permissible fracturing pressure in shale gas wells for wellbore cement sheath integrity. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018; 56: 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.06.012>
19. Ramón Victor Alves Ramalho, Salette Martins Alves, Julio Cezar de Oliveira Freitas, Bruno Leonardo de Sena Costa, Ulisses Targino Bezerra. Evaluation of mechanical properties of cement slurries containing SBR latex subjected to high temperatures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 178: 787–794. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.076>
20. Shivshambhu Kumar, Achinta Bera, Subhash N. Shah. Potential applications of nanomaterials in oil and gas well cementing: Current status, challenges and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022; 213: 110395. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110395>
21. Zhao L., Li N., Yang J., Wang H., Zheng L., Wang C. Alkali-Resistant and pH-Sensitive Water Absorbent Self-Healing Materials Suitable for Oil Well Cement. *Energies*. 2022; 15: 7630. <https://doi.org/10.3390/en15207630>
22. Lian J., Yue J., Xing X., Wu Z. Design and Evaluation of the Elastic and Anti-Corrosion Cement Slurry for Carbon Dioxide Storage. *Energies*. 2023; 16: 435. <https://doi.org/10.3390/en16010435>
23. Moldamuratov Zh.N., Ussenkulov Zh.A., Yeskermessov Zh.E., Shanshabayev N.A., Bapanova Zh.Zh., Nogaibekova M.T., Joldassov S.K. Experimental study of the effect of surfactants and water-cement ratio on abrasion resistance of hydraulic concretes. *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2023; 16(3): 1116–1126. <http://doi.org/10.31788/RJC.2023.1638391>
24. Moldamuratov Zh.N., Imambayeva R.S., Imambaev N.S., Iglikov A.A., Tattibayev S.Zh. Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(4): 306–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318>
25. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия».
26. *API spec. 10B Recommended Practice for Testing Well Cements*.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кабдушев Арман Арстангалиевич – PhD, доцент, заведующий кафедрой «Нефтегазовое и горное дело», Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан, arman-kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3579-9054>

Агзамов Фарит Акрамович – доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Башкортостан, Россия, faritag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5850-5261>

Манапбаев Бауыржан Жарканбекович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое и горное дело», Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан, jiboj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9140-178X>

Молдамуратов Жангазы Нуржанович – PhD, профессор-исследователь факультета общего строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, zhanga_m_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>

ВКЛАД АВТОРОВ

Кабдушев А.А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Агзамов Ф.А. – написание статьи, научное редактирование текста, выявление зависимостей.

Манапбаев Б.Ж. – подготовка образцов, написание статьи, обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Молдамуратов Ж.Н. – постановка расчетных задач, анализ результатов исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 20.11.2023.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582>

CC BY 4.0

Suitability of basalt raw materials of the Kyrgyz Republic for the production of superthin and continuous fibers

Akymbek A. Abdykalykov¹ , Zhanbolot K. Aidaraliev^{1*} , Zhympargul Abdykalyk kyzy² , Altynbek Zh. Kuduev² 
, Burulcha Rashid kyzy¹ 

¹ Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

² Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

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

ABSTRACT: Introduction. Literature analysis and patent search revealed that basalt rock and its fibers have exceptional physical and technical characteristics and alongside abundant raw material reserves. Based on this, the use of basalt rocks and their fibers as a material for the development of advance composite materials with high performance characteristics is a promising direction. Diverse technological fields and economic sectors, as well as various material requirements, necessitate a spectrum of systems, compositions, and properties for basalt and its melts, whether for generating superthin or continuous fibers. **Methods and materials.** The chemical and mineralogical compositions of some basalt rocks from deposits in the Kyrgyz Republic were studied to determine their suitability for production of superthin fibers and continuous fibers. The acidity modulus and fusibility modulus were determined by calculation based on the chemical composition of basalts of the Kyrgyz Republic. Among them, the quality of basalts from the Suluu-Terek deposit and basalts from the Toru-Aigyr deposit fully meets the requirements for the quality of raw materials for creating the production of basalt superthin fibers (BSF) and basalt continuous fibers (CBF). In the research we used physical and chemical analysis methods to determine the chemical and mineralogical composition of basalt. By calculating the acidity and fusibility modulus of basalt raw materials from the Kyrgyz Republic, as well as comparing them with relevant standards, their suitability for the production of basalt superthin fiber (BSF) and basalt continuous fiber (CBF) was established. The object of the study was the basalts of the Sulu-Terek deposit. **Results** of the study include an analysis of the chemical and mineralogical compositions of certain basalt rocks from deposits in the Kyrgyz Republic in order to assess their suitability for the production of superthin and continuous fibers. The acidity modulus and fusibility modulus of basalts of the Kyrgyz Republic were determined by the calculation method. Among them, it was revealed that the quality of basalts from the Suluu-Terek deposit and basalts from the Toru-Aigyr deposit fully meets the requirements for the quality of raw materials for the production of basalt superthin fibers (BSF) and basalt continuous fibers (CBF). **Conclusion.** The suitability of basalt rocks from various deposits, especially Suluu-Terek, Taldy-Bulak and Kashka-Suu, was confirmed, with recommendations for use. The results also highlight the importance of compliance with standards when selecting deposits and setting production parameters.

KEYWORDS: criteria for the suitability of raw materials, rocks, chemical and mineralogical composition, loss on ignition, viscosity modulus, fusibility modulus, upper limit of crystallization temperature (ULCT), basalt superthin fiber (BSFF), basalt continuous fibers (BCF).

FOR CITATION: Abdykalykov A., Aidaraliev Zh.K., Abdykalyk kyzy Zh., Kuduev A.Zh., Rashid kyzy B. Suitability of basalt raw materials of the Kyrgyz Republic for the production of superthin and continuous fibers. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15 (6): 574–582. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582>. – EDN: SNRTSV.

INTRODUCTION

It is known that for production of inorganic mineral fibers, various rocks are mainly used as raw materials. Of particular interest are wastes from energy and mining industries, such as ash and slag wastes and refuse ore [1, 2].

Diabases, basalts, andesite-basalts, gabbro-basalts, dolerites, amphibolites are used for the production of inorganic superthin and continuous fibers from single-component raw materials [3–10].

According to the chemical and mineralogical composition, basalt rocks are the best raw material for production of high-quality inorganic fibers from igneous rocks.

The mineral and chemical composition of basalt rocks for technology of obtaining inorganic fibers are important indicators, since each deposit has a certain mineral and chemical composition within the limits of igneous origin. In this connection, various rock deposits from the earth's crust used as raw materials for production of basalt fibers [3–13].

Considering some physical and technological characteristics of molten rocks, and based on the experimental and theoretical study results of rocks, authors of works [11–13] noted the following: 1) acidity and viscosity modules were calculated according to their chemical composition for a preliminary assessment of the rocks use in the production of basalt fibers; 2) the main criteria for the suitability of raw materials for production of basalt staple and continuous fibers are the melt surface tension, viscosity and its temperature dependence, crystallization and wetting abilities, which determine the lower and upper limits of the temperature range for fiber production.

An important indicator of the raw materials quality for obtaining superthin fibers is its chemical and mineralogical composition, pieces size, as well as the grains of its minerals. For preparation of raw materials crumbs, rocks are used, which, in terms of strength and hardness, should ensure the production of raw materials pieces with a size of 5–40 mm.

About 240 deposits and manifestations of diabases, basalts and basaltic porphyrites have been identified on the Kyrgyz Republic territory [12].

Deposits of diabases, basalts and basaltic porphyrites are located within such ridges as the Kyrgyz, Kungei-Ala-Too, Tasakemin, Terskey, Zhetim-Too, Atbasy, Alai and Atoynok. Manifestations of basalts are widespread within the ranges of Dzhungal, Talas, Kaptakas, Chatkal, Karakatty, Suusamy, Dzhungal, as well as in the Ulug-too mountains. In addition, manifestations of basalts are widespread within such ranges as the Fergana, East Alai, Turkestan and Moldotoo [13].

Currently, the following types of fibers are produced from rocks (in diameter, in microns): microthin (up to 0.5), ultrathin (from 0.5 to 1), superthin (from 1 to 3), thin (from 9 to 15), thick (15 to 25), thick (25 to 150) and

coarse (150 to 500). According to the length, the fibers are divided into continuous, reaching a length of 30 kilometers or more, and discrete (staple), having a length in the range from several millimeters to several centimeters. Depending on the diameter, they are used for different purposes.

Superthin fiber is used for manufacture of pierced heat-insulating and sound-absorbing products, cardboard, multilayer non-woven material, heat-insulating knitting-stitching material, long heat-insulating strips and bundles, soft heat-insulating hydrophobized plates, filters, artificial soil for hydroponic growing of vegetables, etc. These products are widely used in construction, aircraft and shipbuilding, metallurgy, medicine, agriculture, and in other fields of industry [11–26].

METHODS AND MATERIALS

The basalt fiber industry presents raw materials with a variety of requirements, which is associated with products diversity. There are a number of requirements on the raw materials chemical composition, the main substance content, harmful and ballast impurities, and on the uniformity of raw materials composition.

The raw materials are crushed, medium and metamorphosed ultrabasic rocks of volcanic origin: basalts, amphibolites, diabases, porphyrites. The sizes of raw materials fractions should be from 3–70 mm.

When characterizing chemical composition of raw materials suitable for production of a particular fiber type, the content of main oxides SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 was taken into account.

The chemical composition study of basalt rock, basalt melt and its wastes was carried out using the methods of titrimetry, spectroscopy, photoelectrocolorimetry, and gravimetry [27–31].

Loss on ignition was no more than 5% by weight. The raw materials should not contain impurities in the form of metal objects, quartz, sandy-clayey and other rocks that differ in chemical composition.

Assessment of the material composition and quality indicators were determined according to the following standards [32, 33]:

- Technical Conditions-21-Ukrainian SSR-410-86 “Rock raw materials for production of superthin staple fibers”;
- Russian Institute of Standardization Ukrainian SSR-5020-80 “Rock raw materials for the production of staple fibers”;
- Technical Conditions-21-137-84 “Rock raw materials for production of continuous fiber”.
- Technological properties assessment was determined according to the Technical Conditions-234-023-20357632-97 “Canvas from super-thin basalt fiber”.

For mineral fiber production, basalts are used as raw materials, in which the content of iron oxides does not exceed 10–18%, and the ratio of acidic oxides amount ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) to floodplains ($\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O}$) should not be less than 2.

Correspondence of acidic oxides to basic ones (acidity modulus) is calculated using the formula:

$$M_{\text{кл}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}} \quad (1)$$

where SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 are weight content of oxides, %.

The acidity modulus in the deposit ranges from 1.9 to 2.7, averaging 2.3, the minimum acidity modulus exceeds the standard modulus by almost one order (0.72%).

An important property in the production of rock melts is the melting rate, which depends on a set of processes leading to the formation of a homogeneous glass mass devoid of bubbles. The melting rate is estimated from the temperature range and duration of melting; it can be expressed as a function of the ratio of refractory oxides to more fusible ones. With regard to rocks, the fusibility constant $C_{\text{fusibility}}$ has the following form:

$$\Pi_{\text{пл}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}{\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}, \quad (2)$$

where SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 are weight content of oxides, %.

The lower the value of this constant, the easier the rock is melted.

The criteria for the suitability of minerals for obtaining fibers based on the requirements for the mineralogical and chemical composition of rocks, melting conditions, and properties of their melts (Table 1).

For mineral fiber production, basalts are used as raw materials, in which the content of iron oxides does not exceed 10–18%, and the ratio of acidic oxides amount ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) to floodplains ($\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O}$) should not be less than 2.

The mineralogical composition of basalt raw materials has been studied using petrographic analysis. Photographs (at $\times 40$ magnification) made using a Nikon polarizing microscope (Optiphot2-pol series, Japan). Petrographic analyses performed by using polarized light in the following order: a specially prepared preparation studied using a Nikon microscope Optiphot2-pol series. The thin section was a cut in the form of a plate of rock with a thickness of about 0.03 mm, glued onto glass. In the manufacture of thin sections, Canadian balsam was used a special glue. This method of analysis gives an accurate idea of the mineral composition and structure of basalt rocks and basaltic melt [8–10, 14].

Determination of rocks mass loss in was determined during chemical analysis of thermogravimetric studies (up to 1000°C), as well as at 1300 and 1450°C when obtaining melts [34].

Table 1

Requirements for the chemical composition of rocks for the production of various fiber types

Components	Requirements for raw materials quality, (mass fraction, %)			
	Coarse	Continuous	Fine staple	Superthin Staple
Silicon dioxide (SiO_2)	48.0–53.2	47.5–55.0	43–51.0	46.0–52.0
Titanium dioxide (TiO_2)	0.5–2.0	0.2–2.0	0.2–3.0	0.5–2.5
Aluminium oxide Al_2O_3	13.0–18.0	14.0–20.0	10.0–17.0	13.0–18.0
Iron oxides ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)	8.0–15.0	7.0–13.5	10.0–18.0	8.0–15.0
Calcium oxide (CaO)	6.5–11.0	7.0–1.5	10.0–18.0	8.0–15.0
Magnesium oxide (MgO)	3.0–10.0	3.0–8.5	4.0–15.0	3.5–10.0
Sodium and potassium oxides ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)	2.0–7.5	2.5–7.5	2.0–5.0	2.0–10.0
Manganese oxide (MnO), no more than	0.5	0.25	0.4	0.5
Sulfur oxide (SO_3), no more than	1.0	0.2	1.0	0.5
Gain loss during annealing, not more than	5.0	5.0	5.0	5.0
Free quartz, no more than	3.0	2.0	3.0	3.0
Viscosity modulus, Mv	1.9–2.5	2.3–2.7	1.7–2.0	1.8–2.4

Glass preparation was carried out in laboratory conditions in platinum glasses. The weight of the rock was about 300 g. In the temperature range from 1170° to 1350°C, melting of rocks and intense gas evolution were observed, leading to abundant foaming of melt. This is especially characteristic of the almond stone basalt sample 371, due to release of CO₂ during decomposition of CaCO₃. Taking into account the small volume of platinum glasses (500 ml), it took a long time (up to 16 hours) to obtain a homogeneous melt.

The viscosity of studied rock melts was determined on an improved Margules-Volarovich viscometer with working surfaces of the “cylinder-cylinder” type. At the viscosity measurement points, the melt was held isothermally for 30 minutes to establish temperature equilibrium. The method of measuring viscosity is relative. We use polymethylsiloxane PMS-500, PMS-700, PMS-1000 (viscosity range 5–10 pauses) and K-15 glass for calibrating viscometers (GOST 3-3593-77, viscosity range 50–2000 pauses) as calibration substances. The viscosity measurement error does not exceed 7% [35].

The temperature of upper limit crystallization (ETCL) was found using the quenching method (the samples were isothermally held at a given temperature for two hours and then cooled rapidly). The presence of the crystalline

phase in the glass samples obtained using this method was determined by the optical method (under an MBI-6 microscope at 750-fold magnification in transmitted light) and by X-ray phase analysis [35].

RESULTS

Results obtained after study of the basalts chemical composition from the Suluu-Terek, Taldy-Bulak, Kashka-Suu deposits are presented in Table 1.

As a one-component raw material for the production of various types of fibers, basalts with different content of components were selected (Table 2).

From the Table 2 it is seen that, according to the chemical composition, studied rocks belong to low-iron igneous rocks, since the content of iron oxides does not exceed 18%, and the content of SiO₂ in them is generally less than 50%. The content of floodplains is on average 20% and fits within the limits regulated by technical conditions (15–25%).

Basalt of the Kashka-Suu deposit is characterized by high acidity, however, the introduction of the simplest corrective additives in the form of limestone makes it possible to reduce the acidity modulus, which provides a melt with optimal physical and chemical properties.

Table 2

Chemical composition of basalt rocks for the production of superthin fibers

Components	Basalt, mass fraction, %			
	Chemical composition requirements for superthin fibers	Sulu Terek	Taldy Bulak	Kashka Suu
Silicon dioxide (SiO ₂)	46.0–52.0	45.00	48.27	48.85
Titanium dioxide (TiO ₂)	0.5–2.5	2.00	1.75	1.98
Aluminium oxide Al ₂ O ₃	13.0–18.0	14.00	13.98	15.72
Iron oxides (Fe ₂ O ₃ +FeO)	8.0–15.0	12.94	15.28	10.55
Calcium oxide (CaO)	8.0–15.0	11.0	9.49	7.28
Magnesium oxide (MgO)	3.5–10.0	4.0	5.32	5.14
Sodium and potassium oxides (Na ₂ O+K ₂ O)	2.0–10.0	4	4.45	4.41
Manganese oxide (MnO), no more than	0.5	–	–	–
Sulfur oxide (SO ₃), no more than	0.5	–	0.42	0.87
Gain loss during annealing, not more than	5.0	5.0	–	5.2
Free quartz, no more than	3.0	1.6	–	–
Phosphorus oxide P ₂ O ₅	–	–	–	–
%	100	100	100	100
Acidity modulus, M _{acidity}	1.8–2.4	1.90	1.85	2.41
Viscosity modulus, M _v	< 4.5	3.89	4.11	4.58

Table 3

Chemical composition of rocks for production of superthin fibers

Components	Quality requirements for chemical composition (basalt, mass fraction, %)			
	For superthin staple fibers	Siltstone-basalt Tashbulak	Toruai gyr	Semizbel
Silicon dioxide (SiO ₂)	46.0–52.0	45.82	47.0	42.99
Titanium dioxide (TiO ₂)	0.5–2.5	1.99	1.91	1.72
Aluminium oxide Al ₂ O ₃	13.0–18.0	13.86	13.7	13.53
Iron oxides (Fe ₂ O ₃ +FeO)	8.0–15.0	11.82	10.18	12.54
Calcium oxide (CaO)	8.0–15.0	9.57	13.40	9.89
Magnesium oxide (MgO)	3.5–10.0	7.89	3.68	11.23
Sodium and potassium oxides (Na ₂ O +K ₂ O)	2.0–10.0	3.03	4.12	5.38
Manganese oxide (MnO), no more than	0.5	0.18	0.10	
Sulfur oxide (SO ₃), no more than	0.5	0.1	0.21	0.57
Gain loss during annealing, not more than	5.0	4.82	5.40	2.16
Free quartz, no more than	3.0	0.5	–	–
Phosphorus oxide P ₂ O ₅	–	0,21	0.30	–
%		100	100	100
Acidity modulus, M _{acidity}	1.8–2.4	1.90	1.99	1.49
Viscosity modulus, M _v	< 4.5	3.58	3.43	2.67

In terms of oxide content, the basalts from the Taldy-Bulak and Kashka-Suu deposits differ from the basalts from the Suluu-Terek deposit in the higher content of silicon oxides and the lower content of calcium oxides (Table 2). Table 3 shows the basalts chemical composition from Tash-Bulak, Toru-Aigyr, and Semizbel deposits.

From the data presented in Table 3, we can conclude that chemical composition of the Toru-Aigyr deposit fully satisfies the quality requirements for single-component raw materials. However, remaining basalt deposits (Tash-Bulak, Semizbel) require additional introduction of components to meet specified standards, which can be preliminarily calculated through batching.

Basalt from the Suluu-Terek deposit fully meets the requirements for mineralogical composition necessary for production of superthin fibers. However, to produce continuous fibers from this basalt, it will be necessary to carry out a blending process, as indicated Table 4.

DISCUSSION

Thus, according to the chemical composition, the studied rocks belong to low-ferruginous basic igneous rocks, since the content of SiO₂ in them is mainly less than 40 to 50%, and the content of iron oxide does not exceed 18%, fluctuations in the chemical composition

of the studied samples are small, which creates favorable conditions for maintaining the constancy of the charge in the production of mineral wool.

The Kyrgyz Institute “Orgtekhvodstroy” of the basalt deposit Suluu-Terek, based on the geological location of the basalt layer, identified three varieties of basalt (Table 5):

According to the geological location of basalt layer, three kinds of basalts were found in the Suluterek deposit (Table 5):

1. Cryptocrystalline basalt of dark gray color with carbonate admixtures;
2. Fine-crystalline to cryptocrystalline basalt, weathered to varying degrees, with medium and small amygdalae made of carbonate;
3. Almond shaped basalt with amygdalae made of carbonate.

Viscosity and TVIC study results shown in Table 6. The melt properties coincide with the properties of basalts from the Berestovetsk deposit in Ukraine, which are used in all variants.

According to the viscosity (Table 6) absolute values and the temperature dependence course, we can conclude that it is possible to use basalts from the Suluterek deposit as raw materials for production of continuous and superthin fibers. In addition, amygdaloid basalts, which form

Table 4

Suitability of basalt rocks by mineralogical composition for the production of basalt superthin fibers (BSF) and basalt continuous fibers (BCF)

Minerals	Requirements for the quality of raw materials (basalt, limiting mineral content, vol. %)				
	Requirements for mineralogical composition		Basalt deposit		
	For superthin staple fibers	To obtain continuous fibers	Sulu Terek	Taldy Bulak	Kashka Suu
Plagioclase	20–55	35–70	30	40	30
Pyroxenes	5–40	1–35	40	20	30
Ore minerals	0–12	0–12	10	10	10
Olivines	0–15	0–15	–	30	30
Natural glass	2–45	0–50	20	–	20
Quartz	0–2	0–2	–	–	–
Amphiboles	0–15	0–10	–	–	–
Biotite	0–3	0–3	–	–	1
Palagonite	0–20	0–25	–	–	–
Chlorite	0–35	0–35	–	–	–
Epidotzoisitis	0–15	0–5	–	–	–
Carbonate	0–10	0–8	–	–	–

Table 5

Basalt varieties according to geological location

Basalt kinds Components	Cryptocrystalline basalt with carbonate admixtures	Fine-crystalline to cryptocrystalline basalt with rare almond texture	Almond texture basalt
SiO ₂	46.83	48.11	43.82
TiO ₂	1.79	2.22	1.87
Al ₂ O ₃	16.82	18.19	16.55
FeO	2.09	1.48	0.28
Fe ₂ O ₃	7.73	9.41	9.87
CaO	10.54	8.58	12.81
MgO	5.33	4.32	3.91
Na ₂ O	2.57	2.95	2.22
K ₂ O	1.52	1.84	2.00
MnO	0.24	0.16	0.11
SO ₃	00.5	0.08	0.11
Gain loss after ignition	3.68	2.49	7.21
Total	99	99.8	100.85

less viscous melts, can be recommended for producing fibers using the vertical air blowing (VAB) method.

The analysis revealed that in order to ensure the industrial production of basalt superthin fibers (BSF), it is recommended to use single-component raw materials without blending, mainly from the Suluu-Terek and Toru-

Aigyr basalt deposits. For other deposits, the chemical composition should be calculated according to the necessary requirements by introducing additional components. It is recommended to use the technological parameters of basalts from the Suluu-Terek deposit for production of continuous basalt fibers (CBF).

Table 6
Viscosity and TVI of basalt melts from the Suluterek deposit

No	Names of rocks	Viscosity					Crystallization temperature upper limit
		1450	1400	1350	1300	1250	
1	Cryptocrystalline basalt with carbonate admixtures	55	96	165	303	580	1220
2	Fine-crystalline to cryptocrystalline basalt with rare minerals	73	125	206	383	715	1230
3	Almond basalt	30	54	96	182	350	1190
	Basalt Berestovetsky (Ukraine)	36	62	106	190	354	1275

CONCLUSION

Technical requirements for the quality of raw materials are given and research methods for the suitability of basalt raw materials are selected. The physicochemical and technological characteristics of the Kyrgyz Republic igneous rocks used for production of superthin fibers were studied.

The general characteristics of the main igneous rocks on the Kyrgyz Republic territory have been established. The physical, chemical and technological characteristics of igneous rocks of the Kyrgyz Republic and the selection of raw material deposits for the production of superthin and continuous fibers are presented. Technological parameters have been selected for the production technology of superthin and continuous basalt fibers from the Suluu-Terek deposit.

REFERENCES

1. Bogatikov O. A., O. A. Bogatikov. *Igneous rocks*. Moscow: Nauka; 1985.
2. Afanasyeva M. A., Bardina N. Yu., Bogatikov O. A., Veshnevskaya I. I., Gavrilova V.N., Gurova M.N., Kovalenko V.I., Kononkova N.N., Lipchanskaya L.N., Naumov V.B., Popov V.S., Chernov V.I., Sharkov E.V., Yurgenson B.P., Yarmolyuk V.V. *Petrography and petrology of igneous, metamorphic and metasomatic rocks*. M: Logos; 2001.
3. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N. Assessment of the possibility of using rocks of Siberia and the Far East in the production of basalt fibers. *Basalt technologies*. 2021;1:15-18.
4. Raskina E.A., Zemtsova A.N. *Gabbro-basalt raw materials for the production of basalt fiber*. Moscow: Perm VNIIESI; 2003.
5. Buyantuev S.L., Buyantuev S.L., Ning Gong Lin. On the issue of studying the composition and properties of basalt from the Dalian deposit (PRC) to produce a melt by the electric arc method with fiber production. *Vestn. Buryat. state un-ta. Chemistry-Physics*. 2017;2(3):1-9.
6. Dzhigiris D.D., Makhova M.F., Sergeev V.P. Basalt fibrous materials: analyte. Review. M: VNIIESM; 1989;6(3):67.
7. Makhova M.F., Mishenko E.S., Krivonos V.P., Bochkov A.A. Amphibolites – one-component raw materials for mineral fibers. *Exploration and protection of subsoil*. 1989;8:17-21.
8. Myasnikov A.A., Aslanova M.S. Selection of basalt rock compositions for obtaining fibers for various purposes. *Glass and Ceramics*. 1965;3:12-15.
9. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N. Assessment of the possibility of using rocks of Siberia and the Far East in the production of basalt fibers. *Basalt technologies*. 2021;1:15-18.
10. Chernov V.P., Ignatova A.M. Mineralogical and petrographic characteristics of secondary technogenic metallographic resources of the Urals and Cis-Urals for their processing by petrology. *Fundamental research*. 2012;11:670-674.
11. Dzhigiris D.D., Makhova M.F. *Fundamentals of the production of basalt fibers and products*. Moscow: Teploenergetik; 2002.
12. Ormonbekov T.O. *Technology of basalt fibers based products*. Bishkek: Technology; 1997.
13. Ormonbekov T.O. *Equipment and technology for the production of basalt fibers*. Bishkek: Ilim; 2005.
14. Aidaraliev Zh.K., Ismanov Yu.Kh., Kainazarov A.T., Abdiev M.S., Atyrova R.S. Mineralogical phases formed during the crystallization of molten igneous rocks. *International journal of applied and foundation research*. 2019; 2:7-11.

15. Aidaraliev Zh.K., Kainazarov A.T., Ismanov Yu.Kh., Abdiev M.S., Atyrova R.S., Sopubekov N.A. Superthin fibers based on siltstone and basalt, mined in Kyrgyzstan. *International journal of applied and foundation research*. 2019; 5:109-114.
16. Aidaraliev Zh.K., Kainazarov A.T., Abdiev M.S., Sopubekov N.A. Development of technology for producing gypsum-basalt composites. *Bulletin of KRSU*, Bishkek, 2019;19(8):102-105.
17. Minko N.I., Morozova I.I., Pavlenko T.L. Fiberglass for reinforcing cement products. *Glass and ceramics*. 1998;7:3-7.
18. Moroz, S.A. Application of thick basalt fiber in road cement concrete. *Construction materials and structures*. 1987;4:22.
19. Mukhametshin R.N., Dodis G.M., Sokolinskaya M.A., Tutakov O.V. *Basalt-plastic reinforcement for hydraulic structures*. Bishkek: Kyrgyzstan; 1993..
20. Osnos M.S. Basalt continuous fibers – yesterday, today and tomorrow. Development of technologies and equipment, industrial production and sales. *Composite world*. 2015;2:24-29.
21. Pashchenko A.A., Serbin V.P., Paslovskaya A.P., Glukhovskiy V.V., Biryukovich Yu.L., Maltster A.B. *Reinforcement of inorganic substances with mineral fibers*. M: Stroyizdat;1988.
22. Trostyanskaya E.B., Sokolinskaya M.L., Shadchika M., Miychenko I.P. Properties of imido- and phenobasalt plastics. *Plastic masses*. 1987;1:28-29.
23. Treshchalyn Yu.M. *Composite materials based on non-woven fabrics*. Moscow: MSU named after M.V. Lomonosov; 2015.
24. Tutakov O.V., Bozhko V.I. Braided tapes made of basalt fiber. *Construction materials and structures*. 1986;4:14.
25. Uvarov A.S. Technology for the production of basalt fiber and products based on it // *Building materials*. 1998;5:4-6.
26. Khariton Ya.G., Pisarenko G.V. Basalt fibers - reinforcing material. *Building materials and structures*. 1982;2:22-23.
27. Artomanova M.V., Rubakhin A.I., Savelyev V.G. *Workshop on general technology of silicates*. Moscow: Stroyizdat, 1996.
28. Brandon J., Kaplan W. *Microstructure of materials: Methods of research and control*. Moscow: Tekhnosphere, 2004.
29. Zharsky I.N., Novikov G.I. *Physical research methods in inorganic chemistry*. Moscow: Higher School; 1998.
30. Korostelev P.P. *Chemical analysis in metallurgy*. Moscow: Metallurgy; 1988.
31. Perevozchikov B.V. Methodological approaches to the selection of basicite raw materials for obtaining high-quality basalt fiber. *Basalt technologies*. 2012; October–December: 12-14.
32. Technical Conditions V.2.7.88.023.025.-96. Canvases made of micro-, ultra-, super-thin and microcrystalline glass staple fibers from rocks. Technical specifications (41589) [Electronic resource]. Access mode: https://dnaop.com/html/41589/doc%D0%A2%D0%A3_%D0%A3_%D0%92.2.7-88.023.025-96
33. Technical Conditions 576940-024-5042022414-01. Non-flammable heat-resistant slabs based on basalt raw materials. Specifications. 05/01/2001.
34. Borodaev Yu.S. Eremin N.I., Mennikov F.P. *Laboratory methods for studying minerals, ores and rocks*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1988.
35. Dubrovsky V.A., Makhova, M.F., Perveeva L.A. *Method for determining the temperature of the lower limit of glass crystallization using a derivatograph. Methods for studying the technological properties of glass*. Moscow; 1970.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akymbek A. Abdykalykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Advisor to the Rector, Department of Manufacture of Building Materials, Products and Structures, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, abdykalykov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7260-8738>

Zhanbolot K. Aidaraliev – Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Physics Department, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Zhympargul Abdykalyk kyzy – senior teacher, Department of Economics and Taxes, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, gold_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4958-1240>

Altynbek Z. Kuduev – Department of Automated Systems and Digital Technologies, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, altynbek_kuduev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3345-1364>

Burulcha Rashid kyzy – Department of Applied Informatics and Information Security, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, burulcha9090@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7785-6861>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Akymbek A. Abdykalykov – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Zhanbolot K. Aidaraliev – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Zhypargul Abdykalyk kyzy – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Altynbek Z. Kuduev – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text.

Burulcha Rashid kyzy – participation in development of curricula and their implementation.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted on 17.10.2023; approved after reviewing 24.11.2023; accepted for publication 29.11.2023.

Научная статья

УДК 553.2+691

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582>

CC BY 4.0

Пригодность базальтового сырья Кыргызской Республики для производства супертонких и непрерывных волокон

Акымбек Абдыкалыков¹ , Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев^{1*} , Жыпаргул Абдыкалык кызы² ,
Алтынбек Жалилбекович Кудуев² , Бурулча Рашид кызы¹ 

¹ Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

² Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Литературный анализ и патентный поиск выявили, что базальтовая порода и её волокно обладают высокими физико-техническими характеристиками и обширными запасами сырья. Исходя из этого, использование базальтовых пород и их волокон в качестве материала для разработки современных композиционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками представляет собой перспективное направление. Разнообразные области техники и народного хозяйства, а также различные требования, предъявляемые к этим материалам, определяют многообразие систем, составов и свойств базальтов и их расплавов, применяемых для производства как супертонких, так и непрерывных волокон. **Методы и материалы.** Исследованы химический и минералогический составы некоторых базальтовых пород месторождений Кыргызской Республики для определения их пригодности для производства супертонких волокон и непрерывных волокон. Расчетным путем определены модуль кислотности и модуль плавкости по химическому составу базальтов Кыргызской Республики. Среди них качество базальтов Сулуу-Терекского месторождения и базальтов месторождения Тору-Айгыр полностью соответствует требованию к качеству сырья для создания производства базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и базальтовых непрерывных волокон (БНВ). В исследовании применялись методы физико-химического анализа с целью определения химического и минералогического состава базальта. Путем расчетов модуля кислотности и плавкости базальтового сырья Кыргызской Республики, а также сопоставления с соответствующими стандартами была установлена их пригодность для производства базальтового супертонкого волокна (БСТВ) и базальтового непрерывного волокна (БНВ). Объектом исследования выступили базальты месторождения Сулуу-Терек. **Результаты** исследования включают в себя анализ химического и минералогического составов некоторых базальтовых пород месторождений Кыргызской Республики с целью оценки их пригодности для производства супертонких и непрерывных волокон. Расчетным методом определены модуль кислотности и модуль плавкости базальтов Кыргызской Республики. Среди них выявлено, что качество базальтов Сулуу-Терекского месторождения и базальтов месторождения Тору-Айгыр полностью соответствует требованиям к качеству сырья для производства базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и базальтовых непрерывных волокон (БНВ). **Заключение.** Подтверждена пригодность базальтовых пород из различных месторождений, особенно Сулуу-Терек, Талды-Булак и Кашка-Суу, с рекомендациями по использованию. Результаты также акцентируют важность соответствия стандартам при выборе месторождений и настройке параметров производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: критерий пригодности сырья, горные породы, химико-минералогический состав, потери при прокаливании, модуль вязкости, модуль плавкости, температура верхнего предела кристаллизации (ТВПК), базальтовое супертонкое волокно (БСТВ), базальтовые непрерывные волокна (БНВ).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Кудуев А.Ж., Рашид кызы Б. Пригодность базальтового сырья Кыргызской Республики для производства супертонких и непрерывных волокон // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 6. С. 574–582. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582>. – EDN: SNRTSV.

ВВЕДЕНИЕ

Для производства неорганических минеральных волокон, таких, как базальтовые волокна, широко используются различные горные породы, а также отходы от энергетической и горнорудной промышленности. В числе этих отходов выделяются золошлаковые и отходы обогащения руд [1, 2].

Для создания неорганических супертонких и непрерывных волокон из однокомпонентного сырья используют разнообразные горные породы, включая диабазы, базальты, андезито-базальты, габбро-базальты, долериты, амфиболиты и др. [3–10].

Причины, по которым базальтовые породы считаются предпочтительными, связаны с их химическим и минералогическим составом. Базальтовые породы богаты минералами, такими как плагиоклаз, пироксен и оливин, которые обеспечивают хорошие механические и термические характеристики волокон.

Минеральный и химический составы базальтовых пород для технологии получения неорганических волокон являются важными показателями, так как каждое месторождение имеет определенный минеральный и химический состав в пределах магматического происхождения. В связи с чем в качестве сырья для производства базальтовых волокон используются различные месторождения горных пород земной коры [3–13].

На основе результатов экспериментально-теоретического исследования горных пород авторы работ [11–13] выделяют следующие ключевые аспекты:

- В предварительной оценке использования горных пород в производстве базальтовых волокон применяется расчет модуля кислотности и вязкости, который основан на химическом составе пород;
- Критериями пригодности сырья, влияющими на возможность использования сырья для производства базальтовых волокон, являются поверхностное натяжение расплава, вязкость и ее температурная зависимость, кристаллизационная и смачивающая способности, определяющие нижнюю и верхнюю границы температурного интервала выработки волокон, указанные характеристики определяют нижние и верхние границы температурного интервала, в пределах которого происходит производство базальтовых штапельных и непрерывных волокон.

В производстве супертонких волокон важным критерием является качество используемого сырья, которое характеризуется следующими показателями: химико-минералогическим составом и размером кусков и зерен минералов. Для получения мелкой крошки сырья применяют горные породы, которые должны обладать необходимой прочностью и твер-

достью для формирования кусков сырья размером 5–40 мм.

Значительное распространение этих горных пород на территории Кыргызской Республики выражается в наличии приблизительно 240 месторождений и проявлений диабазов, базальтов и базальтовых порфиринов [12].

Залежи диабазов, базальтов и базальтовых порфиринов разведаны в пределах таких хребтов, как Кыргызское, Кунгей-Ала-Тоо, Тасакемин, Терсей, Жетим-Тоо, Атбашы, Алай и Атойнок. Известны проявления базальтов в пределах хребтов Джумгал, Таласс, Каптакас, Чаткал, Каракатты, Суусамыр, Джумгал, Ферганский, Восточноалайский, Туркестанский и Молдоттоо, а также в горах Улугтоо [13].

В настоящее время из горных пород производят различные типы волокон, классифицируемые по диаметру (в микрометрах) и длине. Разновидности волокон включают микротонкие (до 0,5 мкм), ультратонкие (от 0,5 до 1 мкм), супертонкие (от 1 до 3 мкм), тонкие (от 9 до 15 мкм), утолщенные (от 15 до 25 мкм), толстые (от 25 до 150 мкм) и грубые (от 150 до 500 мкм).

В зависимости от длины волокна они делятся на непрерывные, достигающие длины 30 и более километров, и дискретные (штапельные), имеющие длину от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Каждый тип волокон применяется для различных целей в зависимости от их диаметра.

Супертонкое волокно находит применение в различных областях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Оно используется для производства разнообразных изделий, включая прошивные материалы для теплоизоляции и звукопоглощения, картона, многослойного нетканого материала, теплоизоляционного вязально-прошивного материала, длинномерных теплоизоляционных полос и жгутов, мягких теплоизоляционных гидрофобизированных плит, фильтров, а также материала для искусственного грунта в гидропонике для выращивания овощей.

Эти продукты широко используются в различных отраслях, таких как строительство, авиа- и судостроение, металлургия, медицина, сельское хозяйство, а также в других областях промышленности [11–26].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Производство волокна из базальта в индустрии предъявляет разнообразные требования к сырью, обусловленные разнообразием производимой продукции. Особое внимание уделяется химическому составу сырья, содержанию основного вещества, уровню вредных и балластных примесей, а также однородности состава.

Сырье для производства волокна из базальта представлено дроблеными, средними и метаморфизированными ультраосновными горными породами вулканического происхождения, включая базальты, амфиболиты, диабазы и порфириды.

Размеры фракций сырья должны соответствовать от 3 до 70 мм.

При анализе химического состава сырья, предназначенного для производства различных видов волокон, учитывается содержание следующих основных оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 .

В данном исследовании химический состав базальтовой породы, базальтового расплава и его отходов был изучен при помощи методов титриметрии, спектроскопии, фотоэлектроколориметрии и гравиметрии [27–31].

Потери при прокаливании не должны превышать 5% от общей массы. Сырье должно быть лишено посторонних примесей, таких как: металлические предметы, кварц, песчано-глинистые и другие породы, отличающиеся по химическому составу.

Оценка вещественного состава и качественных показателей проводится в соответствии с нижеперечисленными стандартами [32, 33]:

ТУ-21-УССР -410-86 «Сырье из горных пород для производства штапельных супертонких волокон»;

РСТ УССР -5020-80 «Сырье из горных пород для производства штапельных волокон»;

ТУ-21-137-84 «Сырье из горных пород для производства непрерывного волокна».

Оценка технологических свойств осуществляется в соответствии с ТУ-234-023-20357632-97 «Холст из супертонкого базальтового волокна».

Для производства минерального волокна в качестве сырья используются базальты, в которых содержание окислов железа не превышает 10–18%, а соотношение сумм кислых окислов к плавням ($\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O}$) должны быть не менее 2.

Соответствие кислых окисей основным (модуль кислотности) рассчитано по формуле:

$$M_{\text{кл}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}} \quad (1)$$

где SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 и др. – массовое содержание оксидов, %.

Модуль кислотности варьируется от 1,9 до 2,7 в различных месторождениях, среднее значение составляет 2,3. Минимальное значение модуля кислотности превосходит стандартный показатель почти на порядок (0,72%).

Важным аспектом при получении расплавов горных пород является скорость плавления, которая зависит от сложных процессов, приводя-

щих к формированию гомогенной стекломассы, избавленной от пузырьков. Скорость плавления оценивается через температурный интервал и продолжительность плавления, представляя собой функцию отношения тугоплавких оксидов к более легкоплавким. Для горных пород постоянная плавкости $\Pi_{\text{пл}}$ выражается следующим образом – имеет следующий вид:

$$\Pi_{\text{пл}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}{\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}, \quad (2)$$

где SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 и др. – массовое содержание оксидов, %.

Из формулы следует, что, чем меньше значение данной постоянной, тем легче горная порода подается плавлению.

Критерии пригодности минералов для получения волокон определяются требованиями к минералогическому и химическому составам горных пород, условиям плавкости и свойствам их расплавов (табл. 1).

Минералогический состав базальтового сырья был изучен с использованием петрографического анализа. Фотоснимки (при увеличении $\times 40$) получены с использованием поляризационного микроскопа «Nikon» серии Optiphot2-pol (Япония).

Петрографический анализ основан на применении поляризованного света и проводится с использованием микроскопа «Nikon» серии Optiphot2-pol. Анализ включает изучение шлифов – специально приготовленных препаратов. Шлиф представляет собой тонкий срез в форме пластинки из горной породы толщиной около 0,03 мм, закрепленный на стекле при помощи специального клея, такого, как канадский бальзам. Этот метод анализа дает детальное представление о минеральном составе и структуре базальтовых пород и базальтового расплава [8–10, 14].

Определение потерь массы в породах определяли при проведении химического анализа термогравиметрических исследований (до 1000°C), а также при 1300 и 1450°C при получении расплавов [34].

Получение стекла проводилось в лабораторных условиях в платиновых стаканах. Навеска породы составляла около 300 г. В интервале температур 1170–1350°C наблюдалось плавление горных пород и интенсивное выделение газов, приводящее к обильному вспениванию расплава. Особенно характерно это для пробы 371 (базальт миндалекаменный), за счет выделения CO_2 при разложении CaCO_3 . Учитывая малый объем платиновых стаканов (500 мл), для получения гомогенного расплава требовалось длительное время (до 16 часов).

Вязкость расплавов исследуемых горных пород определяли на усовершенствованном вискозиметре Маргулеса–Воларовича с рабочими поверхностями

ми типа «цилиндр–цилиндр». В точках измерения вязкости расплав изотермически выдерживался в течение 30 минут для установления температурного равновесия. Метод измерения вязкости является относительным. В качестве градуировочных веществ нами используется полиметилсилоксан ПМС-500, ПМС-700, ПМС-1000 (диапазон вязкостей 5–10 пауз) и стекло К-15 для градуировки вискозиметров (ГОСТ 3-3593-77, диапазон вязкостей 50–2000 пауз). Ошибка измерения вязкости не превышает 7% [35]

Температуру верхнего предела кристаллизации (ТВПК) находили с помощью метода закалки (образцы изотермически выдерживали при заданной температуре в течение двух часов, а затем резко охлаждали). Наличие кристаллической фазы в полученных с помощью этого метода образцах стекол определяли оптическим методом (под микроскопом МБИ-6 при 750-кратном увеличении в проходящем свете) и методом рентгенофазного анализа [35].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований химического состава базальтов, добываемых на месторождениях Сулуу-Терек, Талды-Булак и Кашка-Суу, представлены в табл. 1.

Химический анализ указывает на то, что исследованные породы принадлежат к категории маложелезистых основных изверженных пород. Это подтверждается содержанием SiO_2 , которое в основном

находится в пределах от 40% до 50%, и отсутствием превышения содержания окиси железа в пределах 18%. Наблюдаемые колебания в химическом составе исследованных образцов минимальны, что создает благоприятные условия для обеспечения стабильности характеристик сырья в процессе производства минеральной ваты.

Для получения разнообразных видов волокон в качестве однокомпонентного сырья были выбраны базальты с различным содержанием компонентов (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что исследованные породы по химическому составу соответствуют маложелезистым изверженным породам, так как содержание окислов железа не превышает 18%, а содержание SiO_2 в основном не превышает 50%. Среднее содержание плавней составляет 20%, что соответствует установленным техническим условиям в пределах (15–25%).

Базальт из месторождения Кашка-Суу характеризуется повышенной кислотностью. Однако введение простых корректирующих добавок, таких как известняк, позволяет снизить модуль кислотности, обеспечивая получение расплава с оптимальными физико-химическими свойствами.

Сравнивая содержание окислов в базальтах месторождений Талды-Булак и Кашка-Суу с базальтом месторождения Сулуу-Терек (табл. 2), можно отметить повышенные значения оксидов кремния и пониженные значения оксидов кальция в первых двух месторождениях.

Таблица 1

Требования по химическому составу горных пород для производства различного вида волокон

Наименование компонентов	Требования к качеству сырья, (Массовое доля, %)			
	Грубые	Непрерывные	Тонкие штапельные	Супертонкие штапельные
SiO_2	48,0–53,2	47,5–55,0	43–51,0	46,0–52,0
TiO_2	0,5–2,0	0,2–2,0	0,2–3,0	0,5–2,5
Al_2O_3	13,0–18,0	14,0–20,0	10,0–17,0	13,0–18,0
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	8,0–15,0	7,0–13,5	10,0–18,0	8,0–15,0
CaO	6,5–11,0	7,0–1,5	10,0–18,0	8,0–15,0
MgO	3,0–10,0	3,0–8,5	4,0–15,0	3,5–10,0
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	2,0–7,5	2,5–7,5	2,0–5,0	2,0–10,0
MnO, не более	0,5	0,25	0,4	0,5
SO_3 , не более	1,0	0,2	1,0	0,5
Потери массы при прокаливании (п.п.п.), не более	5,0	5,0	5,0	5,0
Свободного кварца, не более	3,0	2,0	3,0	3,0
Модуль вязкости, Мв	1,9–2,5	2,3–2,7	1,7–2,0	1,8–2,4

Таблица 2

Химический состав базальтовых пород для производства супертонких волокон

Наименование компонентов	Базальт, массовое доля, %			
	Требования к химическому составу для супертонких волокон	Сулу-Терек	Талды-Булак	Кашка-Суу
SiO ₂	46,0–52,0	45,00	48,27	48,85
TiO ₂	0,5–2,5	2,00	1,75	1,98
Al ₂ O ₃	13,0–18,0	14,00	13,98	15,72
Fe ₂ O ₃ +FeO	8,0–15,0	12,94	15,28	10,55
CaO	8,0–15,0	11,0	9,49	7,28
MgO	3,5–10,0	4,0	5,32	5,14
Na ₂ O + K ₂ O	2,0–10,0	4	4,45	4,41
MnO, не более	0,5	–	–	–
Серы, SO ₃ , не более	0,5	–	0,42	0,87
Потери массы при прокаливании (п.п.п.), не более	5,0	5,0	–	5,2
Свободного кварца, не более	3,0	1,6	–	–
P ₂ O ₅	–	–	–	–
%	100	100	100	100
Модуль кислотности, M _{кл}	1,8–2,4	1,90	1,85	2,41
Модуль плавкости, П _{пл}	< 4,5	3,89	4,11	4,58

Химические составы и процентное содержание компонентов базальтов из месторождений Таш-Булак, Тору-Айгыр и Семизбель приведены в табл. 3

Исходя из представленных данных в табл. 3, можно заключить, что химический состав месторождения Тору-Айгыр полностью удовлетворяет требованиям к качеству однокомпонентного сырья. Однако остальные базальтовые месторождения (Таш-Булак, Семизбель) требуют дополнительного введения компонентов для соответствия указанным стандартам, что можно предварительно рассчитать через подшихтование.

Базальт из месторождения Сулуу-Терек полностью удовлетворяет требованиям к минералогическому составу, необходимому для производства супертонких волокон. Однако для производства непрерывных волокон из данного базальта потребуются провести процесс подшихтования, как указано в табл. 4.

Исходя из геологического расположения базальтового слоя, базальтов месторождение Сулуу-Терек выделены три разновидности базальта (табл. 5):

1. Базальт скрытокристаллический темно-серого цвета с примазками карбоната.

2. Базальт мелкокристаллический до скрытокристаллического, в различной степени выветренный,

со средними и мелкими миндалинами, выполненными карбонатом.

3. Миндалекаменный базальт с миндалинами, выполненными карбонатом.

Результаты исследований вязкости и ТВПК приведены в табл. 6. Свойства расплава совпадают со свойствами базальтов Берестовецкого месторождения Украины, которые используются во всех вариантах. Судя по абсолютным значениям вязкости и ходу температурной зависимости можно сделать вывод о возможности использования базальтов Сулутерекского месторождения в качестве сырья для производства непрерывного и супертонкого волокна. Кроме того, миндалекаменные базальты, образующие менее вязкие расплавы, могут быть рекомендованы для получения волокон способом вертикального раздува воздухом (ВРВ).

Проведенным анализом было выявлено, что с целью обеспечения промышленного производства базальтовых супертонких волокон (БСТВ) рекомендуется использование однокомпонентного сырья без шихтования, преимущественно из базальтовых месторождений Сулуу-Терек и Тору-Айгыр.

Для других месторождений следует проводить расчет химического состава с учетом необходимых требований путем введения дополнительных ком-

Таблица 3

Химический состав горных пород для производства супертонких волокон

Наименование компонентов	Требования к качеству по химическому составу (Базальт, массовое доля, %)			
	Для получения супер-тонких штапельных волокон	Алевролитобазальт Ташбулак	Торуайгыр	Семизбель
SiO ₂	46,0–52,0	45,82	47,0	42,99
TiO ₂	0,5–2,5	1,99	1,91	1,72
Al ₂ O ₃	13,0–18,0	13,86	13,7	13,53
Fe ₂ O ₃ +FeO	8,0–15,0	11,82	10,18	12,54
CaO	8,0–15,0	9,57	13,40	9,89
MgO	3,5–10,0	7,89	3,68	11,23
(Na ₂ O +K ₂ O)	2,0–10,0	3,03	4,12	5,38
MnO, не более	0,5	0,18	0,10	
Серы, SO ₃ , не более	0,5	0,1	0,21	0,57
Потери массы при прокаливании (п.п.п.), не более	5,0	4,82	5,40–	2,16
Свободного кварца, не более	3,0	0,5	–	–
P ₂ O ₅	–	0,21	0,30	–
%		100	100	100
Модуль кислотности, М _{кл}	1,8–2,4	1,90	1,99	1,49
Модуль плавкости, П _{пл}	< 4.5	3,58	3,43	2,67

Таблица 4

Минералогическая пригодность базальтовых пород для производства базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и базальтовых непрерывных волокон (БНВ)

Минералы	Требования к качеству сырья (Базальт, граничные содержания минералов, об. %)				
	Требования по минералогическому составу		Базальтовое месторождение		
	Для БСТВ	Для БНВ	Сулу-Терек	Талды-Булак	Кашка-Суу
Плагиоклаз	20–55	35–70	30	40	30
Пироксены	5–40	1–35	40	20	30
Рудные минералы	0–12	0–12	10	10	10
Оливины	0–15	0–15	–	30	30
Стекло природное	2–45	0–50	20	–	20
Кварц	0–2	0–2	–	–	–
Амфиболы	0–15	0–10	–	–	–
Биотит	0–3	0–3	–	–	1
Палагонит	0–20	0–25	–	–	–
Хлорит	0–35	0–35	–	–	–
Эпидотцоизит	0–15	0–5	–	–	–
Карбонат	0–10	0–8	–	–	–

Таблица 5

Химический состав базальтов Сулутерекского месторождения

№	Наименование	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	SO ₃	П.П.П.	Сумма
1	Базальт скрыто-кристаллический с примазками карбоната	46,83	1,79	16,82	2,09	7,73	10,54	5,33	2,57	1,52	0,24	0,05	3,68	99
2	Базальт мелкокристаллический до скрытокристаллического с редкими миндалинами	48,11	2,22	18,19	1,48	9,41	8,58	4,32	2,95	1,84	0,16	0,08	2,49	99,8
3	Базальт миндалекаменный	43,82	1,87	16,55	0,28	9,87	12,81	3,91	2,22	2,00	0,20	0,11	7,21	100,85

Таблица 6

Вязкость и ТВПК расплавов базальтов Сулутерекского месторождения

№ п/п	Наименование горных пород	Вязкость (П) при °С					ТВПК
		1450	1400	1350	1300	1250	
1	Базальт скрытокристаллический с примазками карбоната	55	96	165	303	580	1220
2	Базальт мелкокристаллический до скрытокристаллического с редкими минералами	73	125	206	383	715	1230
3	Базальт миндалекаменный	30	54	96	182	350	1190
	Базальт Берестовецкий (Украина)	36	62	106	190	354	1275

понентов. Технологические параметры базальтов с месторождения Сулуу-Терек рекомендуется использовать для производства непрерывных базальтовых волокон (БНВ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предоставлены технические стандарты качества сырья и определены методы исследования, направленные на оценку пригодности базальтового сырья. Исследованы физико-химические и технологические характеристики магматических пород Кыргызской Республики используемых в производстве супертонких волокон. Получены общие характеристики основных магматических пород на территории страны. Представлены физико-химические и технологи-

ческие параметры магматических пород Кыргызской Республики, сделан выбор месторождений сырья для производства супертонких и непрерывных волокон. Выбраны технологические параметры для производства супертонких и непрерывных волокон базальта из месторождения Сулуу-Терек.

Исследования химического состава базальтовых пород на месторождениях Сулуу-Терек, Талды-Булак и Кашка-Суу подтвердили их пригодность для производства супертонких волокон. Рекомендуется использовать базальты из месторождений Сулуу-Терек и Тору-Айгыр без шихтования для производства базальтовых супертонких волокон. Для других месторождений предлагается внести дополнительные компоненты, чтобы соответствовать требованиям стандартов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богати́ков О.А. Магматические горные породы. М.: Наука, 1985. 488 с.
2. Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород / М.А. Афанасьева, Н.Ю. Бардина, О.А. Богати́ков, И.И. Вешневская, В.Н. Гаврилова, М.Н. Гурова, В.И. Коваленко, Н.Н. Коно́нкова, Л.Н. Липчанская, В.Б. Наумов, В.С. Попов, В.И. Чернов, Е.В. Шарков, Б.П. Юргенсон, В.В. Ярмолюк. М.: Логос, 2001. 768 с.
3. Татаринцева О.С., Хо́дакова Н.Н. Оценка возможности использования горных пород Сибири и Дальнего Востока в производстве базальтовых волокон. / О.С. Татаринцева, Н.Н. Хо́дакова // Базальтовые технологии. 2021. № 1. С. 15–18.
4. Габбро-базальтовое сырье для производства базальтового волокна / под ред. Э.А. Раскиной, А.Н. Земцова. М.; Пермь: ВНИИЭСИ, 2003. Сер.6: Пром-сть строит. материалов. Вып. 1/2. 96 с.
5. Буянтуев С.Л., Нин Гун Лин К вопросу изучения состава и свойств базальта Далянского месторождения (КНР) для получения расплава электродуговым способом с выработкой волокна // Вестн. Бурят. гос. ун-та. Химия-Физика. 2017. Вып. 2/3. С. 1–9.
6. Базальтоволокнистые материалы: аналит. обзор / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова, Сергеев В.П. М.: ВНИИЭСМ, 1989. Сер. 6, вып. 3. 67 с.
7. Махова М.Ф., Мищенко Е.С., Иванов И.Н., Кривонос В.П., Бочков А.А. Новая сырьевая база для производства супертонких волокон // Разведка и охрана недр. 1986. № 4. С. 20–23.
8. Мясников А.А., Асланова М.С. Выбор составов базальтовых пород для получения волокон различного назначения // Стекло и керамика. 1965. № 3. С. 12–15.
9. Татаринцева О.С., Асланова М.С. Оценка возможности использования горных пород Сибири и Дальнего Востока в производстве базальтовых волокон // Базальтовые технологии. 2021. № 1. С. 15–18.
10. Чернов В.П., Игнатова А.М. Минералого-петрографическая характеристика вторичных техногенных металлографических ресурсов Урала и Предуралья для их переработки петрургией // Фундамент. исслед. 2012. № 11. С. 670–674.
11. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. М.: Теплоэнергетик, 2002. 416 с.
12. Ормонбеков Т.О. Технология базальтовых волокон и изделия на их основе. Бишкек: Технология, 1997. 122 с.
13. Ормонбеков Т.О. Техника и технология производства базальтовых волокон. Бишкек: Илим, 2005. 152 с.
14. Минералогические фазы, образующиеся при кристаллизации расплавленных магматических горных пород / Ж.К. Айдаралиев, Ю.Х. Исманов, А.Т. Кайназаров, Абдиев М.С., Атырова Р.С. // Международный журн. прикладных и фундамент. исслед. 2019. № 2. С. 7–11.
15. Супертонкие волокна на основе алевролита и базальта, добываемых в Кыргызстане / Ж.К. Айдаралиев, А.Т. Кайназаров, Ю.Х. Исманов, Абдиев М.С., Атырова Р.С., Сопубеков Н.А. // Международный журн. прикладных и фундамент. исслед. 2019. № 5. С. 109–114.
16. Разработка технологии получения гипсо-базальтовых композитов / Ж.К. Айдаралиев, А.Т. Кайназаров, М.С. Абдиев, Н.А. Сопубеков // Вестник КРСУ. Бишкек. 2019. Т. 19, № 8. С. 102–105.
17. Минько Н.И., Морозова И.И., Павленко Т.Л. Стекловолокно для армирования цементных изделий // Стекло и керамика. 1998. № 7. С. 3–7.
18. Мороз С.А. Применение толстого базальтового волокна в дорожном цементобетоне // Строительные материалы и конструкции. 1987. № 4. С. 22.
19. Базальтопластиковая арматура для конструкции гидротехнического назначения / Р.Н. Мухаметшин, Г.М. Додис, М.А. Соколинская, О.В. Тутаков. Бишкек: Кыргызстан, 1993. 138 с.
20. Развитие технологий и оборудования, промышленных производств и сбыта // Композитный мир. 2015. № 2. С. 24–29.
21. Армирование неорганических веществ минеральными волокнами / А.А. Пашенко, В.П. Сербин, А.П. Пасловская, В.В. Глуховский, Ю.Л. Бирюкович, А.Б. Солодовник. М.: Стройиздат, 1988. 200 с.
22. Тростянская Е.Б., Соколинская М.Л., Шадчика М., Мийченко И.П. Свойства имидо- и фенобазальтопластов // Пластические массы. 1987. № 1. С. 28–29.
23. Трещалин Ю.М. Композиционные материалы на основе нетканых полотен. М.: МГУ им М.В. Ломоносова, 2015. 220 с.
24. Тутаков О.В., Божко В.И. Плетельные ленты из базальтового волокна // Строительные материалы и конструкции. 1986. № 4. С. 14.

25. Уваров А.С. Технология изготовления базальтового волокна и изделий на его основе // Строит. материалы. 1998. № 5. С. 4–6.
26. Харитон Я.Г., Писаренко Г.В. Базальтовые волокна – армирующий материал // Строительные материалы и конструкции. 1982. № 2. С. 22–23.
27. Артоманова М.В., Рубахин А.И., Савельев В.Г. Практикум по общей технологии силикатов. М.: Стройиздат, 1996. 278 с.
28. Брандон Дж., Каплан У. Микроструктура материалов: методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
29. Жарский И.Н., Новиков Г.И. Физические методы исследования в неорганической химии. М.: Высш. шк., 1998. 271 с.
30. Коростелев П.П. Химический анализ в металлургии. М.: Металлургия, 1988. 383 с.
31. Перевозчиков Б.В. Методологические подходы к выбору базитового сырья для получения высококачественного базальтового волокна // Базальтовые технологии. 2012. Октябрь–декабрь. С. 12–14.
32. ТУ В.2.7.88.023.025.-96. Холсты из микро-, ультра-, супертонких и стекломикроструктурированных стеклянных штапельных волокон из горных пород. Технические условия (41589) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dnaop.com/html/41589/doc%D0%A2%D0%A3_%D0%A3_%D0%92.2.7-88.023.025-96
33. ТУ 576940-024-5042022414-01. Плиты негорючие термостойкие на основе базальтового сырья. Технические условия. Введ. 01.05.2001.
34. Бородаев Ю.С., Еремин Н.И., Меньников Ф.П. Лабораторные методы исследования минералов, руд и пород. М.: Изд-во МГУ, 1988. 296 с.
35. Дубровский В.А., Махова М.Ф., Первеева Л.А. Методика определения температуры нижнего предела кристаллизации стекол с помощью дериватографа // Методы исследования технологических свойств стекла. М. 1970. С. 40–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдыкалыков Акымбек – доктор технических наук, профессор, советник ректора, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, abdykalykov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7260-8738>

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры физики, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Абдыкалык кызы Жыпаргул – старший преподаватель кафедры экономики и налогов, Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика, gold_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4958-1240>

Кудуев Алтынбек Жалилбекович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы и цифровые технологии», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, altynbek_kuduev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3345-1364>

Рашид кызы Бурулча – преподаватель кафедры «Прикладной информатики и информационной безопасности», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, burulcha9090@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7785-6861>

ВКЛАД АВТОРОВ

Абдыкалыков Акымбек – научное руководство, концепция исследования.

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Абдыкалык кызы Жыпаргул – сбор материала по литературным источникам.

Кудуев Алтынбек Жалилбекович – проведение экспериментальной части.

Рашид кызы Бурулча – написание текста, обработка материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023; одобрена после рецензирования 24.11.2023; принята к публикации 29.11.2023.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-583-591>

CC BY 4.0

Managing the accuracy and speed of processes for automated monitoring of construction works in the context of new technologies

Artem O. Rada* , Aleksandr D. Kuznetsov , Anatoly O. Akulov , Nikolay Yu. Kon'kov 

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

* Corresponding author: e-mail: rada.ao@kemsu.ru

ABSTRACT: Introduction. Existing automated construction inspection technologies do not allow the user to select the level of detail. At the same time, in the context of the use of nanotechnology, there is a growing need to expand the capabilities of monitoring and control of construction projects. The aim of the research is to develop, implement software, and validate a technology for controlling the speed and accuracy of constructing three-dimensional models from dense point clouds for automated monitoring of construction works. **Materials and methods.** The research is based on the methodology of non-binary data trees, including the method of constructing octant trees. An unmanned aerial vehicle with an aerial laser scanner, a ground-based scanning total station, and specialized software were used, including the web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” developed with the participation of the authors. **Results and discussion.** In the course of the study, a technology was developed and implemented in software that allows the user to select the required balance between accuracy, degree of detail of monitoring and control data for construction work and time costs and computing power requirements. The comparison is made between a construction project, presented in the form of a building information model, and a three-dimensional model of a real object, obtained from a dense point cloud. The degree of comparison accuracy is set by choosing the level of octrees used. By default, the web application uses level eight. However, in the early stages of construction, when the geometric parameters of a dense point cloud deviate significantly from the design boundaries, the ninth, tenth and other levels can be used. In this case, the accuracy and degree of detail increases. Positive and negative deviations are visualized in red and blue colors, respectively, which allows the user to monitor and control the progress of work at the site. **Conclusions.** The developed technology can be used by customers and other decision makers to control and monitor work.

KEYWORDS: nanotechnology, nanomaterials, monitoring of construction works, construction control, digital technologies, building information model, laser scanning, dense point clouds.

ACKNOWLEDGMENTS: The study was carried out within the framework of a comprehensive scientific and technical program of a full innovation cycle “Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and production of minerals, ensuring industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental load on the environment and risks to the life of the population”, approved by Order of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 No. 1144-r, agreement No. 075-15 -2022-1195 dated September 30, 2022.

FOR CITATION: Rada A.O., Kuznetsov A.D., Akulov A.O., Kon'kov N.Yu. Managing the accuracy and speed of processes for automated monitoring of construction works in the context of new technologies. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15(6): 583–591. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-583-591>. – EDN: SWDELD.

INTRODUCTION

In modern construction, nanotechnologies, new materials with unique properties, and new methods of physical and chemical transformation of traditional materials are being actively introduced. This allows you to create buildings and structures with unique characteristics, sig-

nificantly reduce work time, and also reduce costs at all stages of the facility’s life cycle. However, it is obvious that the use of nanotechnology is associated with higher risks, like any technological innovation, due to the lack of experience and less predictability of processes. Therefore, the use of nanotechnology in construction requires the development of automated monitoring and control

© Rada A.O., Kuznetsov A.D., Akulov A.O., Kon'kov N.Yu., 2023

capabilities to assess the situation and make decisions. This can only be achieved using digital technology.

Comprehensive digitalization of processes, equipment, control objects, and human activities is the most important global trend in the technological development of the economy [1, 2]. The advantages of digital technologies (for example, unmanned vehicles, the Internet of things, thermal, laser scanning of objects, etc.) are well known and have been repeatedly described in the literature, such as high speed [3], greater accuracy [4], independence from the qualifications and conscientiousness of performers [5], significant improvement in the quality of information support for management decisions [6], etc.

A central place in the process of digitalization of various sectors of material production is the creation of “digital twins” of control objects – models in the information environment that almost completely reproduce reality online [7, 8]. The use of such doubles for control and monitoring of the situation not only provides decision makers with comprehensive information (which was previously unavailable), but also ensures the choice of optimal management influences, rational planning, and the possibility of proactive actions (not waiting for obvious manifestations of problems) [9, 10].

Although the construction industry is often characterized as “conservative” [11], digital technologies are quite actively penetrating it. The review [12] highlights the main areas of construction digitalization, which include building information modeling using BIM models, augmented and virtual reality, laser scanning, robotics, three-dimensional printing, Internet of things, specialized software, digital twins, and blockchain. Another review article [13] examines the use of computer vision, the Internet of things, BIM models for quality management in construction and reducing the number of defects caused by insufficient qualifications, low motivation of personnel and other reasons.

A review of works on the benefits of digital technologies in construction highlights such advantages as improving the quality of visualization, improving data exchange between participants, increasing productivity, and reducing construction waste [14]. In particular, under certain conditions, the use of digital technologies can contribute to the implementation of the ESG agenda and increased sustainability of the construction economy [15].

The introduction of digital technologies in construction faces certain problems associated with barriers to control and competence [16]. The lag of construction from other types of economic activity in digitalization also led to the slow growth of labor productivity. However, the COVID-19 pandemic has served as a powerful stimulus for the widespread adoption of digital technologies [17].

Experts support the opinion that digitalization is becoming the “new normal” for the construction industry [18, 19]. Russian authors also note both the importance of introducing digital technologies in construction and the problems associated with the need for significant investments and the shortage of qualified specialists [20, 21, 22].

One of the main digital technologies most important for the development of construction is the creation and operation of digital twins of construction projects in the form of BIM models. A significant number of works have been published that discuss the use of BIM models for the design of buildings, structures, and control of construction works. They are considered a technology that significantly speeds up construction, ensures cost reduction and a high level of quality of work performed in accordance with the project [23]. The construction information modeling market is valued at \$7.9 billion in 2023, with the potential to grow to \$15 billion in 2028¹. It should be noted that in a number of countries around the world, the use of BIM has been mandatory for quite a long time in construction at the expense of the state budget [24].

To build BIM models, information about the state of the construction site is used, obtained using various technologies – laser scanning, Internet of things, thermal imaging, etc. [25] in order to have a complete and accurate picture of the real world for decision-making. These models cover all stages of the life cycle of buildings, including planning, design, construction itself, operation, and disposal [26]. An important advantage of building information modeling is the wide possibilities for visualization, including three-dimensional visualization, as well as the accuracy of measurements [27].

These features of BIM models allow solving a wide range of technical problems. For example, in [28] an information model of a medical complex is described, created to reduce the spread of nosocomial infections. The authors of the study [29] consider the case of using a BIM model for designing the most energy-efficient buildings, as well as minimizing waste.

One of the main problems in the development and operation of a BIM model is the rational organization of collecting and processing a large amount of information characterizing a construction project. After the completion of design and the start of construction works, constant monitoring and control of the construction site is necessary. In a limited period of time, the BIM model receives large amounts of information that must be processed with acceptable speed and accuracy [30].

This information affects changes in the geometric parameters of a building or structure under construction, the volume of materials used for construction over certain

¹ Building Information Modeling Market. 2028. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-information-modeling-market-95037387.html> (accessed 10/20/2023).

periods of time, on certain dates, as well as the strength of structures, their thermal conductivity, etc. [31]. Quite often, laser scanning data is used to control and monitor construction works with BIM models [32]. When using laser scanners, dense point clouds are created, which are then converted into three-dimensional models of a real construction site using special software [33].

This approach to creating digital twins of buildings can already be considered classic, traditional. However, it is most often used, as an analysis of a number of scientific works shows, for one-time construction of digital models of fairly large objects [34, 35]. The use of laser scanning for operational automated monitoring and control of construction works is discussed less frequently [36]. This is due to the fact that existing technologies do not allow users to fully choose the relationship between the quality (accuracy) of model construction, on the one hand, and the costs of laser scanning and data processing (time and financial costs) on the other hand. At the same time, in practical problems it is advisable to use different levels of detail of information contained in dense point clouds depending on the stage of construction and other factors.

In other words, it is advisable to allow users to independently determine the level of detail and accuracy of 3D models built on the basis of dense point clouds, without being limited by the default parameters of the software. This will expand the number of user options and make it possible to make the most productive use of the computing power of existing computer equipment. In accordance with the above, the purpose of the study is the development, software implementation and testing of technology for controlling the speed and accuracy of constructing three-dimensional models using dense point clouds for automated monitoring of construction work.

METHODS AND MATERIALS

When conducting the research, the following technical means were used for aerial and ground laser scanning of construction sites:

1. Commercial class unmanned aircraft (UAV) “DJI Matrice Pro” made in the People’s Republic of China, hexacopter type, flight speed up to 65 km/h, maximum take-off weight 15.5 kg, maximum flight altitude 2.5 km, communication range 5 km, longest flight duration 18 minutes, intended for operation at wind speeds up to 8 m/sec. The UAV has an onboard satellite navigation system receiver (GNSS receiver).

2. Airborne laser scanner, designed for placement on an UAV “AGM-MS3.200”, manufactured in the Rus-

sian Federation, scanning frequency 600 kHz, maximum scanning distance 150 m, review – 360 degrees, range determination accuracy – 3 cm, coordinate determination accuracy – 5 cm, weight – 1.3 kg.

3. Trimble scanning tachometer “Trimble SX10”, manufactured in the United States of America, scanning speed up to 26,000 points per second in a range of up to 600 m, laser beam size 14 mm per 100 m, reflectorless mode up to 800 m, prism measurement range up to 5500 m, angular accuracy 1”, minimum measured distance 1 m.

To process dense point clouds and construct three-dimensional models, the “Credo Scan 3D” program was used (developed by Credo-Dialog Company LLC, Moscow, Russian Federation). The software implementation of the author’s developments was carried out in a specialized web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” (the application was developed by the Institute of Digital Science at Kemerovo State University, Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation with the participation of some of the authors of this study²).

The study used the methodology of non-binary data trees and the method of constructing octant trees. The objects of work were several non-residential buildings and structures under construction in the city of Kemerovo (Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation) in 2022–2023.

RESULTS AND DISCUSSION

The study included the following stages:

1. Obtaining laser scanning data as individual stages of construction are completed for comparison with the project presented in the BIM model.

2. Construction of octrees for faster search of coordinates of points obtained from laser scanning results.

3. Search for the nearest starting point (reference) for calculating deviations of the actual state of the construction project from the planned state using the algorithm for searching for the nearest points.

4. Calculation of distances for each point and subsequent visualization of the results using a color scale.

Based on the results of laser scanning, dense clouds with billions of points are formed, so processing, storing and using the relevant information requires large computing power and (or) significant time costs. To reduce them, the methodology of non-binary data trees can be used, in particular, the construction of octrees. This makes it possible to speed up the search for the coordinates of each

² Certificate of state registration of a computer program Certificate number: RU 2023663552. Application number: 2023662975 Registration date: 06/24/2023. Publication date: 06/24/2023. Authors: Rada A.O., Kuznetsov A.D., Snezhkov A.M., Zverev R.E., Nepomnishev I.L., Chernykh G.S., Timofeev A.E., Popov P.S., Kon’kov N.Yu., Tyutikov A.A., Nikitina O.I., copyright holder – Federal state budgetary educational institution of higher education “Kemerovo State University”. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54198120_50908639.PDF (access date 10/15/2023).

point and groupings of closely located points, reduce the need for computing power and (or) reduce the time of work.

An octree is designed to recursively and regularly partition three-dimensional space in the shape of a cube into a bounding region. Each subsequent level of division divides the top level cube (parent) into 8 child cubes (lower level). Thus, at the first level, the original cube (null cube) is divided into 8 child cubes of the first level (see Figure 1). Then the cubes of the first level are divided into 8 child cubes of the second level, etc.

At the same time, the number of cubes by level of detail increases in accordance with the following proportion: at the first level the detail is $8^2 = 64$, at the second level – $8^3 = 512$ cubes, etc. The construction of octrees (recursion) stops either when there are no points in the cube, or when the maximum level of detail specified by the user is reached. The construction of octrees makes it possible to quickly determine which points obtained from laser scanning results lie in specific cubes. Accordingly, the search for point coordinates, finding nearest neighbors and solving similar problems of processing dense point clouds are accelerated.

The tree structure of the octree makes it possible to use a coding scheme in which for each point a long code of $3n$ bits is defined, where n is the maximum subdivision level of the octree. To encode the zero-level cube, numbers from 1 to 7 are used. For example, in Figure 1, the number “3” corresponds to the zero-level cube (also called a cell) in which a certain point is located. Each bit corresponds to the position of the cell relative to the par-

ent cube in one dimension. These numbers are combined for all successive levels to construct the cell code. The encoding process is fast, since the algorithmic complexity of encoding is linear in nature, depending only on the number of points and the level of the cube (the complexity class of the algorithm is “linear time”, type $O(n)$).

Next, the codes were sorted to make the octree structure more convenient for quick calculations. This makes it possible to quickly find the codes of dense cloud points, as well as all points laying in a cell of a given level I . An increase in search speed is achieved due to the fact that only the first 3 I bits of codes are considered. The time complexity of the algorithm is minimal, since it corresponds to the complexity class “linear-logarithmic time” ($O(n \log n)$). The octree structure is easy to maintain because it is highly flexible, allowing you to easily add or remove points.

At the next stage of the study, it was necessary to place the initial BIM model (building design) and dense point clouds in a single coordinate system. Since the BIM model was created taking into account the geodetic reference and coordinate system, and the real object is built in accordance with this model, monitoring and control of construction works are carried out in the same reference system. If the original BIM model (project) and dense point clouds (result of work monitoring) are in a single coordinate system, then the same method of constructing octrees should be applied to them.

Each octree structure is computed starting from the same source cube, which is the smallest cube that contains all the clouds. Therefore, similar cells in all octrees

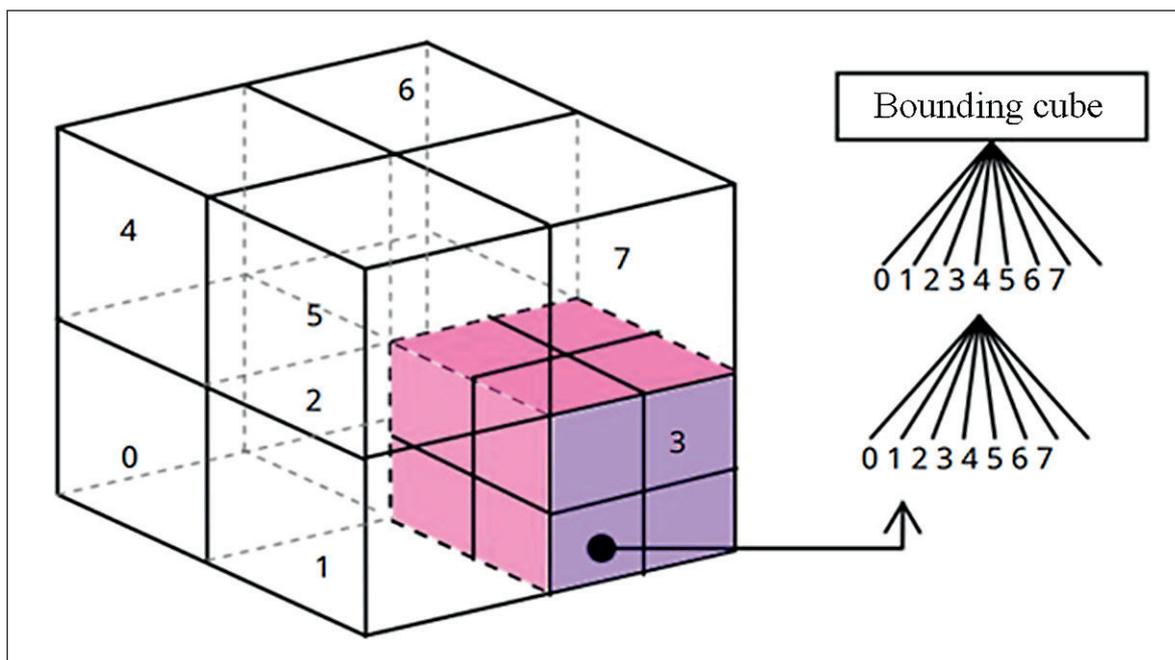


Fig. 1. General scheme for dividing three-dimensional space using octrees

are spatially equivalent. Therefore, the subsets of points located in these cells are also comparable; to find the nearest points and calculate the distances between points, it is necessary and sufficient to select cubes with the same code, that is, take cells of different clouds located in the same spatial coordinates.

A distinctive feature of the technology developed in the study is the ability to select the level of detail when comparing dense point clouds with a BIM model. Thus, the user has the option to prioritize greater accuracy or greater speed of calculations, depending on specific needs and the type of tasks being solved. For this purpose, different levels of octrees are used on which calculations are carried out. The lower the level of octrees, the higher the accuracy of the calculations and the higher the costs and vice versa.

By default, the web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” uses the eighth level of detail. It was determined experimentally based on quantitative data on the density and size of point clouds. If the dense cloud points are far enough from the BIM model (early stage of construction, when a relatively small part of the building is built), then lower levels of octrees (ninth, tenth, etc.) with a higher degree of detail should be used. At later stages, lower levels of detail can be used, which reduces calculation time and/or computing power requirements.

As a result of processing dense point clouds and comparing them with the original BIM model, the web application “Management system for monitoring construc-

tion work at sites that have passed the state examination” displays a heat map. It shows deviations of the actual state of the construction project from the BIM model (building design, structure). An example of the program interface is shown in Figure 2.

It should be noted that when comparing dense point clouds with a BIM model, it is necessary to take into account the normals of the latter’s polygonal mesh. The normal reflects the outside of the polygon mesh surface. Accordingly, all points that are located beyond the plane of the current triangle of the polygonal mesh show a positive deviation from the BIM model (and are colored red).

If the point is on the side opposite to the direction of the normal, then this means a negative deviation, which is visualized in blue. When analyzing deviations, you need to take into account that in some cases the direction of the normals may be distorted. The direction of the normals may depend on the characteristics of the polygonal mesh, the specifics of the applied computational algorithms and other factors. It is most rational to set the normals in a certain way when designing a construction project, that is, to standardize them at the initial stage of work.

The web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” allows the user to configure a heat map with fixed tolerances. An example is shown in Figure 3. Thus, the part of the image highlighted in red means a positive deviation of the actual state of the construction project from the project (BIM model) by more than 5 cm upward. These may be temporary structures, stocks of materials and tools located on site,

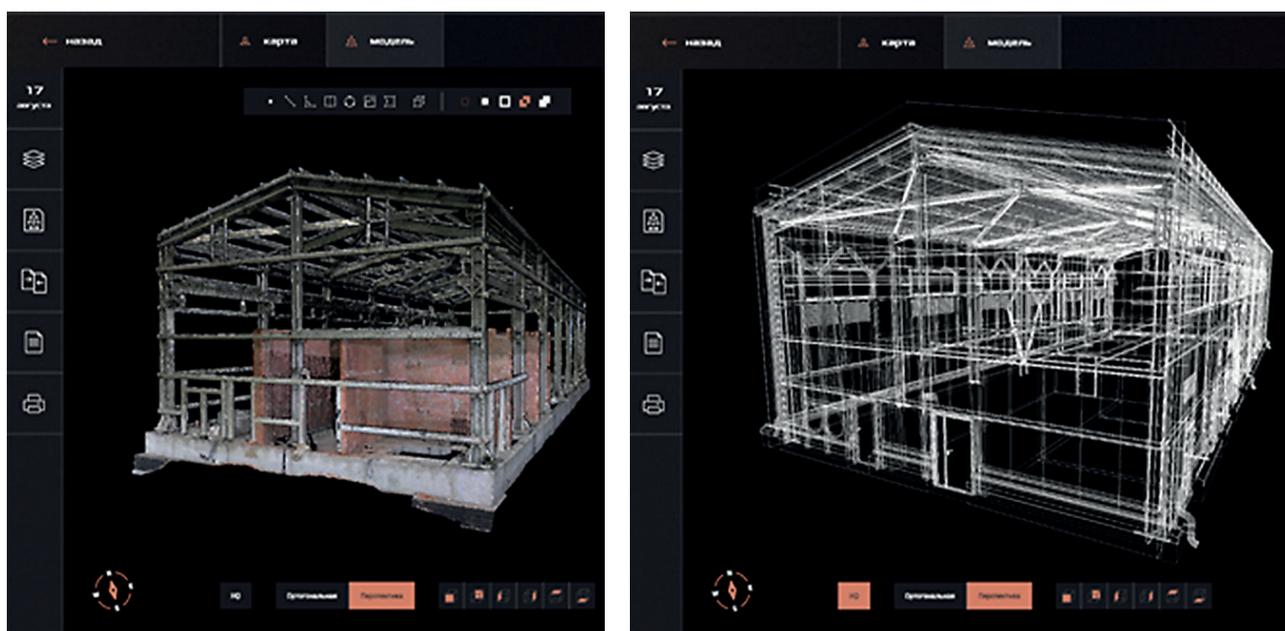


Fig. 2. An example of the interface of the web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” (on the left is a dense point cloud, on the right is a BIM model)

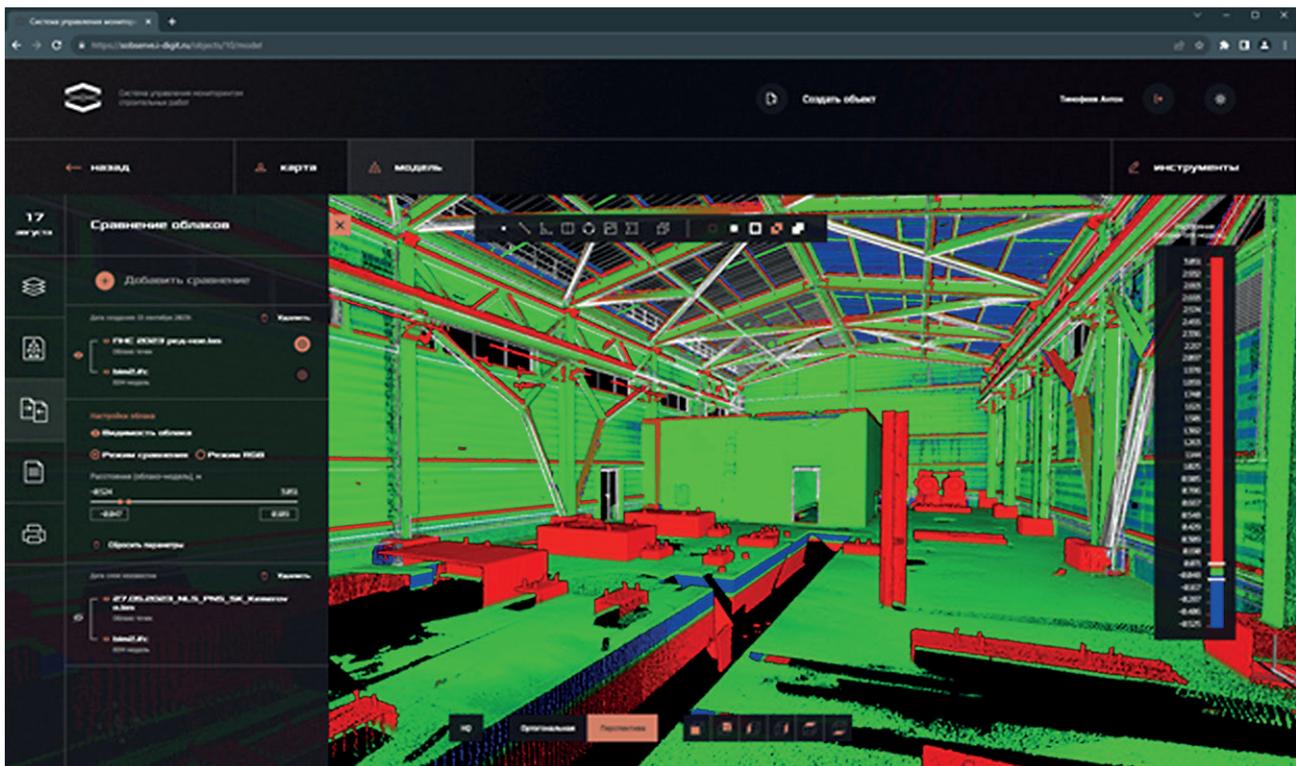


Fig. 3. An example of visualization of the results of comparing a dense point cloud with a BIM model in the web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise”

as well as deviations of geometric parameters from the design during construction (for example, a large height or thickness of walls, which indicates an overconsumption of material).

Blue fill in fig. 3 denotes a downward deviation of actual parameters from the design ones, when the geometric parameters of the real object have not yet reached the design values. Thus, the developed web application makes it possible to visualize deviations from design values with the required degree of detail and rational use of computing power.

CONCLUSION

Currently, BIM models are being quite widely introduced into the construction industry as digital twins of buildings and structures, which make it possible to monitor work automatically and identify deviations. This technology has great production and economic advantages, but its use is to a certain extent hampered by the need to collect and process large volumes of information (billions of points based on the results of a single laser scan), which requires large computing power and (or) a long time. Therefore, it is necessary to develop software solutions that allow the user to choose a rational balance between speed and accuracy of monitoring construction work, depending on specific tasks.

The study used data from both terrestrial and laser scanning of a number of construction sites, which made it possible to obtain dense point clouds as an empirical basis for the development and testing of technology for monitoring and control of construction work with the ability to select the level of detail.

For the purpose of information processing, the octree methodology was used, which allows reducing the need for computing resources, because tree structures speed up the search for coordinates of points through the use of algorithms of the “linear time” and “linear-logarithmic time” complexity classes. Spatial similarity of the project in the BIM model and dense point clouds obtained during monitoring and control of construction work has also been implemented. In this case, you can consider 2 cubes (cells) from the BIM model and a dense point cloud, which are presented in the same coordinates.

The developed web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state expertise” implements the option to select the accuracy of detail, which depends on the number of octree levels used. By default, the eighth level is set, but if necessary, at earlier stages of construction with large differences in geometric parameters from the design ones, you can select the ninth, tenth and lower levels. Then the number of levels can be rationally reduced, which saves time and computing resources.

The study identified and analyzed the risk of incorrect interpretation of information when comparing a dense point cloud with a BIM model due to distortion of the direction of normals. Therefore, it is advisable to recommend standardizing the directions of normals when developing a construction project, that is, at the initial stage.

After processing dense point clouds in the web application “Management System for Monitoring Construction Works on Objects that have undergone state exper-

tise” positive and negative deviations of the geometric parameters of the work from the design parameters are visualized in color. Red color means positive deviations, geometric parameters exceeding the design values. Negative deviations are visualized in blue. This allows users to conduct automated operational monitoring of the progress of construction work, the condition of construction objects with the choice of the required level of accuracy and rational use of computing resources.

REFERENCES

1. Zhang C., Yang Q., Zhang J., Gou L., Fan H. Topic mining and future trend exploration in digital economy research. *Information*. 2023; 14(8): 432. <https://doi.org/10.3390/info14080432>
2. Amankwah-Amoah J., Khan Z., Wood G., Knight G. COVID-19 and digitalization: The great acceleration. *Journal of Business Research*. 2021; 136: 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.08.011>
3. Shahadat M.M.H., Chowdhury A.H.M.Y., Nathan R.J., Fekete-Farkas M. Digital technologies for firms’ competitive advantage and improved supply chain performance. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023; 16(2): 94. <https://doi.org/10.3390/jrfm16020094>
4. Jabir B., Rabhi L., Falih N. RNN- and CNN-based weed detection for crop improvement: an overview. *Foods and Raw Materials*. 2021; 9(2): 387–396. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-387-396>
5. Chin, H., Marasini, D.P. & Lee, D. Digital transformation trends in service industries. *Service Business*. 2023; 17: 11–36. <https://doi.org/10.1007/s11628-022-00516-6>
6. Calderon-Monge E., Ribeiro-Soriano D. The role of digitalization in business and management: a systematic literature review. *Review of Managerial Science*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11846-023-00647-8>
7. Asad U., Khan M., Khalid A., Lughmani W.A. Human-centric digital twins in industry: a comprehensive review of enabling technologies and implementation strategies. *Sensors*. 2023; 23(8): 3938. <https://doi.org/10.3390/s23083938>
8. Moreno T., Almeida A., Toscano C., Ferreira F., Azevedo A. Scalable Digital Twins for industry 4.0 digital services: a dataspace approach. *Production & Manufacturing Research*. 2023; 11(1): 2173680. <https://doi.org/10.3390/s23083938.10.1080/21693277.2023.2173680>
9. Villalonga A., Negri E., Fumagalli L., Macchi M., Castaño F., Haber R. Local decision making based on distributed digital twin framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2020; 53(2): 10568–10573. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2806>
10. Agrell C., Rognlien Dahl K., Hafver A. Optimal sequential decision making with probabilistic digital twins. *SN Applied Sciences*. 2023; 5: 114. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05316-9>
11. Sepasgozar S.M.E., Khan A.A., Smith K., Romero J.G., Shen X., Shirowzhan S., Li H., Tahmasebinia F. BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. *Buildings*. 2023; 13(2): 441. <https://doi.org/10.3390/buildings13020441>
12. Olanipekun A.O., Sutrisna M. Facilitating digital transformation in construction – a systematic review of the current state of the art. *Frontiers in Built Environment*. 2021; 7: 660758. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2021.660758>
13. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12: 100087. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100087>
14. Manzoor B., Othman I., Pomares J.C. Digital technologies in the architecture, engineering and construction (AEC) Industry – a bibliometric-qualitative literature review of research activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(11): 6135. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116135>
15. Zhang Q., Chan A., Yang Y., Guan J., Choi T. Influence of learning from incidents, safety information flow, and resilient safety culture on construction safety performance. *Journal of Management in Engineering*. 2023; 39(3): <https://doi.org/10.1061/JMENA.MEENG-5223>

16. Schnell P., Haag P., Jünger H.C. Implementation of digital technologies in construction companies: establishing a holistic process which addresses current barriers. *Businesses*. 2023; 3(1): 1–18. <https://doi.org/10.3390/businesses3010001>
17. Elrefaey O., Ahmed S., Ahmad I., El-Sayegh S. Impacts of COVID-19 on the use of digital technology in construction projects in the UAE. *Buildings*. 2022; 12(4): 489. <https://doi.org/10.3390/buildings12040489>
18. Papadonikolaki E., Krystallis I., Morgan, B. Digital technologies in built environment projects: review and future directions. *Project Management Journal*. 2022; 53 (5): 501–519. <https://doi.org/10.1177/87569728211070225>
19. Tung Y.-H., Chia F.-C., Yong F. Y.-Y. Exploring the usage of digital technologies for construction project management. *Planning Malaysia*. 2021; 19(17): 13–22. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i17.983>
20. Milkina Yu.A., Makarova E.E. Introduction of modern information technologies in the construction industry. *Organizer of production*. 2021; 29(3): 101–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.66.40.010>
21. Volkova L.V. Improvement of quality systems in construction based on digital technologies. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; (9): 68–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-68-79>
22. Romanova E.V., Magera T.N. Digital technologies in training of builders: Social interaction in the construction industry. *Estimate and Contractual Work in Construction*. 2022; (2): 59–64. <https://doi.org/10.33920/str-01-2202-09>
23. Almujiabah H. Assessment of building information modeling (BIM) as a time and cost-saving construction management tool: evidence from two-story villas in Jeddah. *Sustainability*. 2023; 15(9): 7354. <https://doi.org/10.3390/su15097354>
24. Kumar B. Building Information Modeling: Road to 2016. *International Journal of 3-D Information Modeling*. 2012; 1(4): 1–7. <http://doi.org/10.4018/ij3dim.2012100101>
25. Casini M. Extended reality for smart building operation and maintenance: a review. *Energies*. 2022; 15(10): 3785. <https://doi.org/10.3390/en15103785>
26. Chiu W.-B. Building information modeling application in engineering design performance prediction. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2022; 11(1): 28–34. <https://doi.org/10.18178/ijscer.11.1.28-34>
27. Zhou X., Wang M., Liu Y.-S., Wang Q., Guo M., Zhao J. Heterogeneous network modeling and segmentation of building information modeling data for parallel triangulation and visualization. *Automation in Construction*. 2021; 131: 103897. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103897>
28. Rahla Rabia M.P., Sathish Kumar D., Farooq J., Pachauri R.K. Applications of Building Information Modeling for COVID-19 spread assessment due to the organization of building artifacts. *Data Science for COVID-19*. 2022; 2: 319–333. <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-90769-9.00009-8>
29. Taher A.H., Elbeltagi E.E. Integrating building information modeling with value engineering to facilitate the selection of building design alternatives considering sustainability. *International Journal of Construction Management*. 2023; 23(11): 1886–1901. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.2021465>
30. Halmetoja E. The conditions data model supporting building information models in facility management. *Facilities*. 2019; 37(7/8): 484–501. <https://doi.org/10.1108/F-11-2017-0112>
31. Abdel-Tawab M., Kineber A.F., Chileshe N., Abanda H., Ali A.H., Almukhtar A. Building information modelling implementation model for sustainable building projects in developing countries: a PLS-SEM approach. *Sustainability*. 2023; 15(12): 9242. <https://doi.org/10.3390/su15129242>
32. Skrzypczak I., Oleniacz G., Leśniak A., Zima K., Mrówczyńska M., Kazak J.K. Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. *Building Research & Information*. 2022; 50(8): 859–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2011703>
33. Rashdi R., Martínez-Sánchez J., Arias P., Qiu Z. Scanning technologies to building information modelling: a review. *Infrastructures*. 2022; 7(4): 49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040049>
34. Nap M.-E., Chiorean S., Cira C.-I., Manso-Callejo M.-Á., Păunescu V., Șuba E.-E., Sălăgean T. Non-destructive measurements for 3D modeling and monitoring of large buildings using terrestrial laser scanning and unmanned aerial systems. *Sensors*. 2023; 23(12): 5678. <https://doi.org/10.3390/s23125678>
35. Kartini G.A.J., Saputri N.D. 3D Modeling of Bosscha Observatory with TLS and UAV integration data. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 2022; 9(1): 37–46. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.9.1.37-46>
36. Ibrahimkhil M.H., Shen X., Barati K., Wang C.C. Dynamic progress monitoring of masonry construction through mobile SLAM mapping and as-built modeling. *Buildings*. 2023; 13(4): 930. <https://doi.org/10.3390/buildings13040930>

AUTHORS INFORMATION

Artem O. Rada – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Digitalization, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, rada.ao@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7678-8402>

Aleksandr D. Kuznetsov – Director of the Center for Geodesy, Aerial Survey and Cadastral Works of the Institute of Digitalization, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, adkuz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1986-3039>

Anatoly O. Akulov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Management named in honor I.P. Povarich, Institute of Economics and Management, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, akuanatolij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2301-7943>

Nikolay Yu. Kon'kov – leading programmer of the development department of the Institute of Digitalization, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, n.konkov@i-digit.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3817-4893>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Artem O. Rada – writing sections “Introduction”, “Conclusion”, and general scientific guidance.

Aleksandr D. Kuznetsov – writing the “Results and Discussion” section, organizing work on ground and airborne laser scanning.

Anatoly O. Akulov – writing the “Methods and Materials” section, preparing a list of sources.

Nikolay Yu. Kon'kov – carrying out the experimental part of the study, development and software implementation of computational algorithms.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.

Научная статья

УДК 69.001.5

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-583-591>

CC BY 4.0

Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий

Артём Олегович Рада* , Александр Дмитриевич Кузнецов , Анатолий Олегович Акулов ,
Николай Юрьевич Коньков 

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: rada.ao@kemsu.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Существующие технологии автоматизированного строительного контроля не позволяют пользователю выбирать уровень детализации. В то же время в условиях применения нанотехнологий растет потребность в расширении возможностей мониторинга и контроля объектов строительства. Цель исследования – разработка, программная реализация и апробация технологии управления скоростью и точностью построения трехмерных моделей по плотным облакам точек для автоматизированного мониторинга строительных работ. **Материалы и методы.** Исследование базируется на методологии недрочичных деревьев данных, включая метод построения деревьев октантов. Используются беспилотное воздушное судно с лазерным воздушным сканером, наземный сканирующий тахеометр, специализированное программное обеспечение, в том числе разработанное при участии авторов веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу». **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования разработана и получила программную реализацию технология, позволяющая пользователю выбирать необходимое соотношение между точностью, степенью детализации данных мониторинга и контроля строительных работ и затратами времени, потребностями в вычислительной мощности. Сравнению подлежат проект строительного объекта, представленный в виде информационной модели здания, и трехмерная модель реального объекта, полученная из плотного облака точек. Степень точности сравнения устанавливается путем выбора используемого уровня октодеревьев. По умолчанию в веб-приложении используется восьмой уровень. Однако на ранних этапах строительства, когда геометрические параметры плотного облака точек существенно отклоняются от проектных границ, можно использовать девятый, десятый и другие уровни. В этом случае повышается точность и степень детализации. Положительные и отрицательные отклонения визуализируются красным и синим цветами, соответственно, что позволяет пользователю вести мониторинг и контроль хода работ на объекте. **Выводы.** Разработанная технология может использоваться заказчиками и другими лицами, принимающими решения для контроля и мониторинга работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнология, наноматериалы, мониторинг строительных работ, строительный контроль, цифровые технологии, информационная модель здания, лазерное сканирование, плотные облака точек.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, № соглашения 075-15-2022-1195 от 30.09.2022 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Коньков Н.Ю. Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 6. С. 583–591. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-583-591>. – EDN: SWDELD.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве активно внедряются нанотехнологии, новые материалы с уникаль-

ными свойствами, новые способы физико-химической трансформации традиционных материалов. Это позволяет создавать здания и сооружения с уникальными характеристиками, существенно снижать

© Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Коньков Н.Ю., 2023

сроки работ, а также сокращать затраты на всех стадиях жизненного цикла объекта. Однако очевидно, что использование нанотехнологий связано с более высокими рисками, как и любая технологическая инновация вследствие отсутствия опыта и меньшей предсказуемости процессов. Поэтому использование нанотехнологий в строительстве требует развития возможностей автоматизированного мониторинга и контроля для оценки ситуации и принятия решений. Это может быть достигнуто только с использованием цифровых технологий.

Комплексная цифровизация процессов, оборудования, объектов управления, деятельности человека является важнейшим глобальным трендом технологического развития экономики [1, 2]. Хорошо известны и неоднократно описаны в литературе такие преимущества цифровых технологий (например, беспилотной техники, Интернета вещей, теплового, лазерного сканирования объектов и др.), как высокая скорость [3], большая точность [4], независимость от квалификации и добросовестности исполнителей [5], значительное повышение качества информационного обеспечения управленческих решений [6] и др.

Центральное место в процессе цифровизации различных отраслей материального производства занимает создание «цифровых двойников» объектов управления – моделей в информационной среде, практически полностью воспроизводящих реальность в режиме онлайн [7, 8]. Использование таких двойников для контроля, мониторинга ситуации не только дает лицам, принимающим решения, исчерпывающую информацию (которая ранее была недоступной), но и обеспечивает выбор оптимальных управленческих воздействий, рациональное планирование, возможность опережающих действий (не дожидаться явного проявления проблем) [9, 10].

Хотя строительную отрасль нередко характеризуют как «консервативную» [11], в нее достаточно активно проникают цифровые технологии. В обзоре [12] выделены основные направления цифровизации строительства, к которым отнесены информационное моделирование зданий с использованием BIM-моделей, дополненная и виртуальная реальность, лазерное сканирование, робототехника, трехмерная печать, Интернет вещей, специализированное программное обеспечение, цифровые двойники, блокчейн. В другой обзорной статье [13] рассматривается применение компьютерного зрения, Интернета вещей, BIM-моделей для управления качеством в строительстве и сокращения количества дефектов, обусловленных недостаточной квалификацией, низкой мотивацией персонала и другими причинами.

В обзоре работ по преимуществам цифровых технологий в строительстве выделены такие преимущества, как повышение качества визуализации, улучшение обмена данными между участниками, повышение производительности, сокращение строительных отходов [14]. В частности, при определенных условиях использование цифровых технологий может способствовать реализации ESG-повестки и росту устойчивости экономики строительства [15].

Внедрение цифровых технологий в строительство сталкивается с определенными проблемами, связанными с барьерами контроля и компетентности [16]. Отставание строительства от других видов экономической деятельности в цифровизации обусловило также медленные темпы роста производительности труда. Однако пандемия COVID-19 послужила мощным стимулом широкого повсеместного внедрения цифровых технологий [17]. Специалисты поддерживают мнение о том, что цифровизация становится «новой нормой» для строительной отрасли [18, 19]. Российские авторы также отмечают как важность внедрения цифровых технологий в строительство, так и проблемы, связанные с необходимостью значительных инвестиций, дефицитом квалифицированных специалистов [20, 21, 22].

Одна из основных цифровых технологий, наиболее важных для развития строительства, – это создание и эксплуатация цифровых двойников строительных объектов в виде BIM-моделей. Опубликовано значительное число работ, где рассматривается использование BIM-моделей для проектирования зданий, сооружений, контроля строительных работ. Они считаются технологией, которая значительно ускоряет строительство, обеспечивает снижение затрат и высокий уровень качества выполнения работ в соответствии с проектом [23]. Рынок строительного информационного моделирования оценивается в 7,9 млрд. долл. США в 2023 г. с перспективой роста до 15 млрд. долл. США в 2028 г.¹ Следует отметить, что в ряде стран мира уже достаточно давно использование BIM является обязательным при строительстве за счет средств государственного бюджета [24].

Для построения BIM-моделей используется информация о состоянии объекта строительства, полученная с использованием различных технологий – лазерное сканирование, Интернет вещей, тепловизионная съемка и др. [25], чтобы иметь полную и точную картину реального мира для принятия решений. Данные модели охватывают все стадии жизненного цикла зданий, включая планирование, проектирование, собственно строительство, эксплуатацию, утилизацию [26]. Важным преимуществом

¹ Building Information Modeling Market. 2028. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-information-modeling-market-95037387.html> (дата обращения 20.10.2023).

информационного моделирования зданий являются широкие возможности для визуализации, включая трехмерную визуализацию, а также точность измерений [27].

Эти особенности BIM-моделей позволяют решать широкий круг технических задач. Например, в [28] описана информационная модель медицинского комплекса, созданная с целью сокращения распространения внутрибольничных инфекций. Авторами исследования [29] рассматривается кейс использования BIM-модели для проектирования максимально энергоэффективных зданий, а также минимизации отходов.

Одна из основных проблем при разработке и эксплуатации BIM-модели — это рациональная организация сбора и обработки большого объема информации, характеризующей строительный объект. После завершения проектирования и начала строительных работ необходим постоянный мониторинг и контроль объекта строительства. В ограниченный промежуток времени в BIM-модель поступают большие объемы информации, которые необходимо обработать с приемлемой скоростью и точностью [30].

Данная информация затрагивает изменения геометрических параметров строящегося здания, сооружения, объем использованных для строительства материалов за определенные промежутки времени, на определенные даты, а также прочность конструкций, их теплопроводность и др. [31]. Достаточно часто для контроля и мониторинга строительных работ с использованием BIM-моделей применяют данные лазерного сканирования [32]. При использовании лазерных сканеров создаются плотные облака точек, которые затем с применением специального программного обеспечения преобразуются в трехмерные модели реального объекта строительства [33].

Такой подход к созданию цифровых двойников зданий уже можно считать классическим, традиционным. Однако он чаще всего применяется, как показывает анализ ряда научных работ, для одноразового построения цифровых моделей достаточно крупных объектов [34, 35]. Использование лазерного сканирования для оперативного автоматизированного мониторинга и контроля строительных работ обсуждается реже [36]. Это обусловлено тем, что существующие технологии не позволяют пользователям полноценно выбирать соотношение между качеством (точностью) построения модели с одной стороны и затратами на лазерное сканирование и обработку данных (временными и финансовыми издержками) — с другой стороны. В то же время в практических задачах целесообразно использовать разные уровни детализации информации, содержащейся в плотных облаках точек в зависимости от стадии строительства и других факторов.

Иными словами, целесообразно предоставить возможность пользователям самостоятельно определять уровень детализации и точности трехмерных моделей, построенных на основе плотных облаков точек, не ограничиваясь параметрами, заложенными в программное обеспечение «по умолчанию». Это расширит количество опций пользователей и даст возможность максимально продуктивно использовать вычислительную мощность имеющейся компьютерной техники. В соответствии со сказанным, цель исследования — разработка, программная реализация и апробация технологии управления скоростью и точностью построения трехмерных моделей по плотным облакам точек для автоматизированного мониторинга строительных работ.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При проведении исследования для воздушно-го и наземного лазерного сканирования объектов строительства применялись следующие технические средства:

1. Беспилотное воздушное судно (БВС) коммерческого класса «DJI Matrice Pro» производства Китайской Народной Республики, тип «гексакоптер», скорость полета — до 65 км/ч, максимальная взлетная масса — 15,5 кг, максимальная высота полета — 2,5 км, дальность связи — 5 км, наибольшая длительность полета — 18 мин, предназначено для эксплуатации при скорости ветра до 8 м/сек. БВС имеет бортовой приемник системы спутниковой навигации (GNSS-приемник).

2. Воздушный лазерный сканер, предназначенный для размещения на БВС марки «АГМ-МС3.200», производства Российской Федерации, частота сканирования — 600 кГц, максимальная дистанция сканирования — 150 м, обзор — 360 градусов, точность определения дальности — 3 см, точность определения координат — 5 см, вес — 1,3 кг.

3. Сканирующий тахеометр «Trimble SX10», производства Соединенных Штатов Америки, скорость сканирования до 26000 точек в секунду в диапазоне до 600 м, размер пучка лазерных лучей 14 мм на 100 м, безотражательный режим до 800 м, дальность измерений по призме до 5500 м, угловая точность 1", минимальное измеряемое расстояние 1 м.

Для обработки плотных облаков точек и построения трехмерных моделей использовалась программа «Credo Скан 3D» (разработчик — ООО «Компания «Кредо-Диалог»», Москва, Российская Федерация). Программная реализация авторских разработок осуществлялась в специализированном веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» (приложение разработано Институтом

цифры Кемеровского государственного университета с участием части авторов данного исследования²).

В исследовании использованы методология недвоичных деревьев данных, метод построения деревьев октантов. Объектами работ было несколько нежилых зданий и сооружений, строящихся в городе Кемерово (Кемеровская область, Кузбасс, Российская Федерация) в 2022-2023 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование включало в себя следующие этапы:

1. Получение данных лазерного сканирования по мере выполнения отдельных этапов строительства для сравнения с проектом, представленным в BIM-модели.

2. Построение октодеревьев для более быстрого поиска координат точек, полученных по результатам лазерного сканирования.

3. Поиск ближайшей отправной точки (референса) для расчета отклонений фактического состояния объекта строительства от планового состояния с помощью алгоритма поиска ближайших точек.

4. Расчет расстояний для каждой точки с последующей визуализацией результатов при помощи цветовой шкалы.

По результатам лазерного сканирования формируются плотные облака с миллиардами точек, поэтому для обработки, хранения и использования соответствующей информации нужны большие вычислительные мощности и (или) значительные временные затраты. Для их снижения может быть использована методология недвоичных деревьев данных, в частности, построение октодеревьев. Это дает возможность ускорить поиск координат каждой точки и группировок близко расположенных точек, снизить потребность в вычислительных мощностях и (или) сократить время проведения работ.

Восьмиричное октодерево предназначено для рекурсивного и регулярного разделения трехмерного пространства в форме куба на ограничивающей области. Каждый следующий уровень деления разделяет куб верхнего уровня (родительский) на 8 дочерних кубов (более низкого уровня). Таким образом, на первом уровне исходный куб (нулевой куб) делится на 8 дочерних кубов первого уровня (см. рис. 1). Затем кубы первого уровня делятся на 8 дочерних кубов второго уровня и т.д.

При этом количество кубов по уровням детализации растет в соответствии с такой пропорцией, когда на первом уровне детализация составляет $8^2 = 64$, на втором уровне – $8^3 = 512$ куба и т.д. По-

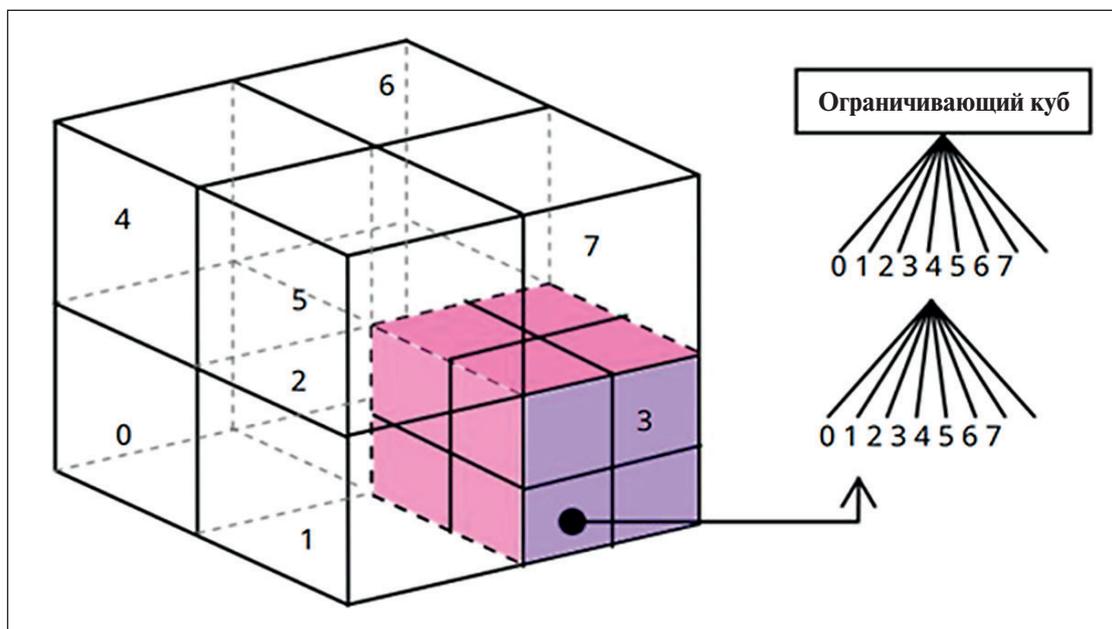


Рис. 1. Общая схема разделения трехмерного пространства с использованием октодеревьев

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Номер свидетельства: RU 2023663552. Номер заявки: 2023662975 Дата регистрации: 24.06.2023. Дата публикации: 24.06.2023. Авторы: Рада А.О., Кузнецов А.Д., Снежков А.М., Зверев Р.Е., Непомнишев И.Л., Черных Г.С., Тимофеев А.Е., Попов П.С., Коньков Н.Ю., Тютиков А.А., Никитина О.И., правообладатель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет». URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54198120_50908639.PDF (дата обращения 15.10.2023).

строение октодеревьев (рекурсия) останавливается либо когда в кубе отсутствуют точки, либо когда достигается максимальный уровень детализации, заданный пользователем. Построение октодеревьев дает возможность быстро определить, какие точки, полученные по результатам лазерного сканирования, лежат в конкретных кубах. Соответственно, ускоряется поиск координат точек, нахождение ближайших соседей и решение аналогичных задач обработки плотных облаков точек.

Древовидная структура октодеревья дает возможность использовать схему кодирования, при которой для каждой точки определяется длинный код длиной $3n$ бит, где n – максимальный уровень подразделения октодеревья. Для кодирования куба нулевого уровня используются числа от 1 до 7. Например, на рис. 1 число «3» соответствует кубу нулевого уровня (также называемому ячейкой), в котором расположена определенная точка. Каждый бит соответствует положению ячейки относительно родительского куба в одном измерении. Эти числа объединяются для всех последовательных уровней с целью построения кода ячейки. Процесс кодирования идет быстро, так как алгоритмическая сложность кодирования имеет линейный характер, зависит только от количества точек и уровня куба (класс сложности алгоритма – «линейное время», вида $O(n)$).

Далее коды сортировались, чтобы сделать структуру октодеревья более удобной для быстрых расчетов. Это дает возможность в короткие сроки находить коды точек плотного облака, а также все точки, лежащие в ячейке заданного уровня I . Повышение скорости поиска достигается за счет того, что рассматриваются только первые $3I$ бит кодов. Временная сложность алгоритма минимальна, поскольку он соответствует классу сложности «линейно-логарифмическое время» ($O(n \log n)$). Структуру октодеревья легко поддерживать, поскольку она обладает высокой гибкостью, достаточно удобно добавлять или удалять точки.

На следующем этапе исследования было необходимо разместить исходную BIM-модель (проект здания) и плотные облака точек в единой системе координат. Поскольку BIM-модель создавалась уже с учетом геодезической привязки и системы координат, а реальный объект строится в соответствии с этой моделью, то мониторинг и контроль строительных работ выполняются в одной и той же системе отсчета. Если исходная BIM-модель (проект) и плотные облака точек (результат мониторинга работ) находятся в единой системе координат, то к ним следует применять один и тот же метод построения октодеревьев.

Каждая структура октодеревья вычисляется, начиная от одного и того же исходного куба, который

является наименьшим кубом, вмещающим все облака. Следовательно, подобные ячейки во всех октодеревьях пространственно эквивалентны. Поэтому подмножества точек, находящихся в этих ячейках, также сопоставимы, для нахождения ближайших точек, вычисления расстояний между точками необходимо и достаточно сделать выборку кубов с одним и тем же кодом, то есть взять ячейки разных облаков, находящихся в одних и тех же пространственных координатах.

Отличительной особенностью разработанной в исследовании технологии является возможность выбора уровня детализации при сравнении плотных облаков точек с BIM-моделью. Таким образом, у пользователя появляется опция задать приоритет большей точности или большей скорости вычислений в зависимости от конкретных потребностей типа решаемых задач. Для этого используются разные уровни октодеревьев, на которых проводятся вычисления. Чем ниже уровень октодеревьев, тем выше точность расчетов и выше затраты и наоборот.

По умолчанию в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» используется восьмой уровень детализации. Он был определен экспериментально на основе количественных данных о плотности и размере облаков точек. Если точки плотного облака находятся достаточно далеко от BIM-модели (ранний этап строительства, когда построена сравнительно небольшая часть здания), то следует использовать более низкие уровни октодеревьев (девятый, десятый и т.д.) с более высокой степенью детализации. На более поздних этапах можно использовать более низкие уровни детализации, что сокращает время проведения расчетов и (или) потребности в вычислительной мощности.

В результате обработки плотных облаков точек и их сопоставления с исходной BIM-моделью, веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» выводит тепловую карту. Она показывает отклонения фактического состояния объекта строительства от BIM-модели (проекта здания, сооружения). Пример интерфейса программы показан на рис. 2.

Следует отметить, что при сравнении плотных облаков точек с BIM-моделью нужно учесть нормали полигональной сетки последней. Нормаль отражает внешнюю сторону поверхности полигональной сетки. Соответственно, все точки, которые расположены за плоскостью текущего треугольника полигональной сетки, показывают положительное отклонение от BIM-модели (и окрашиваются в красный цвет). Если точка находится на стороне, противоположной

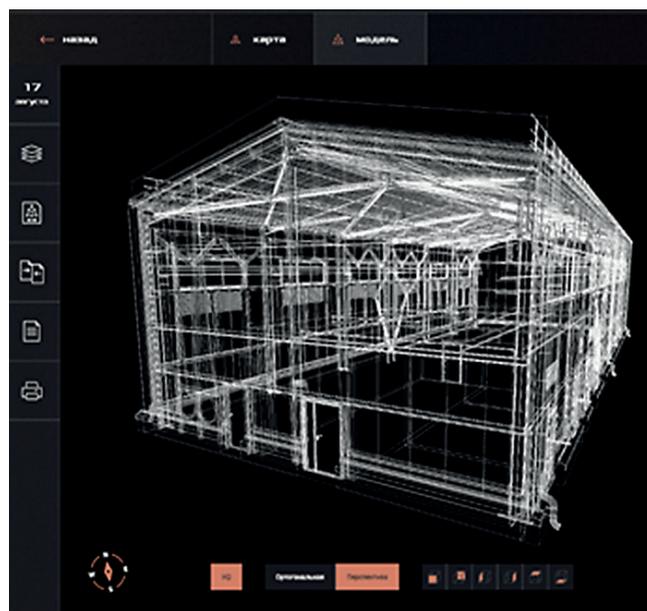
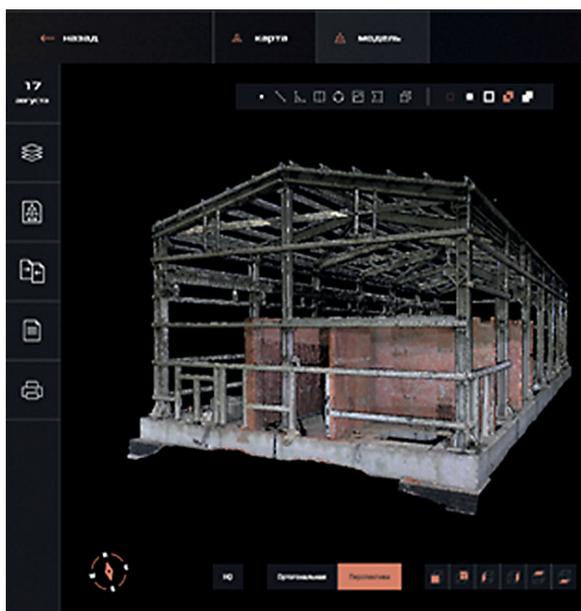


Рис. 2. Пример интерфейса веб-приложения «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» (слева – плотное облако точек, справа – BIM-модель)

направлению нормали, то это означает отрицательное отклонение, которое визуализируется синим цветом.

При анализе отклонений нужно учесть, что в некоторых случаях направление нормалей может быть искажено. Направление нормалей может зависеть от особенностей полигональной сетки, специфики применяемых вычислительных алгоритмов и других факторов. Наиболее рационально задавать нормали определенным образом при проектировании строительного объекта, то есть стандартизировать их на начальном этапе работы.

Веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу», дает возможность пользователю настроить тепловую карту с фиксированными допусками. Пример представлен на рис. 3. Так, часть изображения, выделенная красным цветом, означает положительное отклонение фактического состояния объекта строительства от проекта (BIM-модели) более чем на 5 см. в большую сторону. Это могут быть временные конструкции, запасы материалов и инструмент, расположенные на объекте, а также отклонения геометрических параметров от проекта в ходе строительства (например, большая высота или толщина стен, которая указывает на перерасход материала).

Синяя заливка на рис. 3 обозначает отклонение фактических параметров от проектных в меньшую сторону, когда геометрические параметры реального объекта еще не достигли проектных значений. Таким образом, разработанное веб-приложение дает возможность визуализировать отклонения от проект-

ных значений с необходимой степенью детализации и рациональным использованием вычислительных мощностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в строительную отрасль довольно широко внедряются BIM-модели в качестве цифровых двойников зданий, сооружений, которые позволяют вести мониторинг работ в автоматическом режиме и выявлять отклонения. Такая технология имеет большие производственные и экономические преимущества, но ее использование в определенной степени затрудняется необходимостью сбора и обработки больших объемов информации (миллиарды точек по результатам одного лазерного сканирования), что требует больших вычислительных мощностей и (или) продолжительного времени. Поэтому необходимо разрабатывать программные решения, которые позволяют пользователю выбирать рациональное соотношение скорости и точности мониторинга строительных работ в зависимости от конкретных задач.

В исследовании были использованы данные как наземного, так и лазерного сканирования ряда объектов строительства, что позволило получить плотные облака точек как эмпирическую основу для разработки и апробации технологии мониторинга и контроля строительных работ с возможностью выбора уровня детализации.

С целью обработки информации использована методология октодеревьев, позволяющая снизить

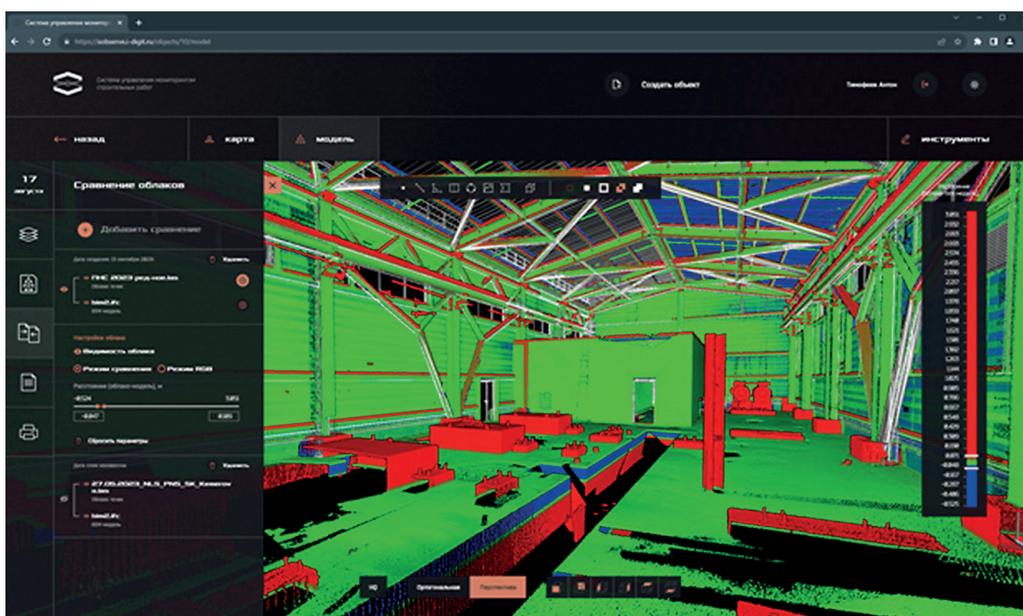


Рис. 3. Пример визуализации результатов сравнения плотного облака точек с BIM-моделью в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу»

потребности в вычислительных ресурсах, т.к. древовидные структуры ускоряют поиск координат точек за счет использования алгоритмов классов сложности «линейное время» и «линейно-логарифмическое время». Также реализовано пространственное подобие проекта в BIM-модели и плотных облаков точек, получаемых в ходе мониторинга и контроля строительных работ. В этом случае можно рассматривать 2 куба (ячейки) из BIM-модели и плотного облака точек, которые представлены в одних и тех же координатах.

В разработанном веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» реализована опция выбора точности детализации, которая зависит от количества используемых уровней октодеревьев. По умолчанию установлен восьмой уровень, но при необходимости, на более ранних этапах строительства с большими отличиями геометрических параметров от проектных, можно выбрать девятый, десятый и более низкие уровни. Затем количество уровней рационально сокращать, что экономит время и вычислительные ресурсы.

В ходе исследования установлен и проанализирован риск некорректной интерпретации информации при сравнении плотного облака точек с BIM-моделью вследствие искажения направления нормалей. Поэтому целесообразно рекомендовать стандартизировать направления нормалей при разработке строительного проекта, то есть на начальном этапе.

После обработки плотных облаков точек в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» положительные и отрицательные отклонения геометрических параметров работ от проектных визуализируются цветом. Красный цвет означает положительные отклонения, выход геометрических параметров за проектные значения. Синим цветом визуализируются отрицательные отклонения. Это дает возможность пользователям вести автоматизированный оперативный мониторинг хода строительных работ, состояния объектов строительства с выбором необходимого уровня точности и рациональным использованием вычислительных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang C., Yang Q., Zhang J., Gou L., Fan H. Topic mining and future trend exploration in digital economy research. *Information*. 2023; 14(8): 432. <https://doi.org/10.3390/info14080432>
2. Amankwah-Amoah J., Khan Z., Wood G., Knight G. COVID-19 and digitalization: The great acceleration. *Journal of Business Research*. 2021; 136: 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.08.011>

3. Shahadat M.M.H., Chowdhury A.H.M.Y, Nathan R.J., Fekete-Farkas M. Digital technologies for firms' competitive advantage and improved supply chain performance. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023; 16(2): 94. <https://doi.org/10.3390/jrfm16020094>
4. Jabir B, Rabhi L, Falih N. RNN- and CNN-based weed detection for crop improvement: an overview. *Foods and Raw Materials*. 2021; 9(2): 387–396. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-387-396>
5. Chin, H., Marasini, D.P. & Lee, D. Digital transformation trends in service industries. *Service Business*. 2023; 17: 11–36. <https://doi.org/10.1007/s11628-022-00516-6>
6. Calderon-Monge E., Ribeiro-Soriano D. The role of digitalization in business and management: a systematic literature review. *Review of Managerial Science*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11846-023-00647-8>
7. Asad U., Khan M., Khalid A., Lughmani W.A. Human-centric digital twins in industry: a comprehensive review of enabling technologies and implementation strategies. *Sensors*. 2023; 23(8): 3938. <https://doi.org/10.3390/s23083938>
8. Moreno T., Almeida A., Toscano C., Ferreira F., Azevedo A. Scalable Digital Twins for industry 4.0 digital services: a dataspace approach. *Production & Manufacturing Research*. 2023; 11(1): 2173680. <https://doi.org/10.3390/s23083938.10.1080/21693277.2023.2173680>
9. Villalonga A., Negri E., Fumagalli L., Macchi M., Castaño F., Haber R. Local decision making based on distributed digital twin framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2020; 53(2): 10568–10573. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2806>
10. Agrell C., Rognlien Dahl K., Hafver A. Optimal sequential decision making with probabilistic digital twins. *SN Applied Sciences*. 2023; 5: 114. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05316-9>
11. Sepasgozar S.M.E., Khan A.A., Smith K., Romero J.G., Shen X., Shirowzhan S., Li H., Tahmasebinia F. BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. *Buildings*. 2023; 13(2): 441. <https://doi.org/10.3390/buildings13020441>
12. Olanipekun A.O., Sutrisna M. Facilitating digital transformation in construction – a systematic review of the current state of the art. *Frontiers in Built Environment*. 2021; 7: 660758. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2021.660758>
13. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12: 100087. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100087>
14. Manzoor B., Othman I., Pomares J.C. Digital technologies in the architecture, engineering and construction (AEC) Industry – a bibliometric-qualitative literature review of research activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(11): 6135. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116135>
15. Zhang Q., Chan A., Yang Y., Guan J., Choi T. Influence of learning from incidents, safety information flow, and resilient safety culture on construction safety performance. *Journal of Management in Engineering*. 2023; 39(3): <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5223>
16. Schnell P., Haag P., Jünger H.C. Implementation of digital technologies in construction companies: establishing a holistic process which addresses current barriers. *Businesses*. 2023; 3(1): 1–18. <https://doi.org/10.3390/businesses3010001>
17. Elrefaey O., Ahmed S., Ahmad I., El-Sayegh S. Impacts of COVID-19 on the use of digital technology in construction projects in the UAE. *Buildings*. 2022; 12(4): 489. <https://doi.org/10.3390/buildings12040489>
18. Papadonikolaki E., Krystallis I., Morgan, B. Digital technologies in built environment projects: review and future directions. *Project Management Journal*. 2022; 53 (5): 501–519. <https://doi.org/10.1177/87569728211070225>
19. Tung Y.-H., Chia F.-C., Yong F. Y.-Y. Exploring the usage of digital technologies for construction project management. *Planning Malaysia*. 2021; 19(17): 13–22. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i17.983>
20. Милкина Ю.А., Макарова Е.Е. Внедрение современных информационных технологий в строительную отрасль // Организатор производства. 2021. Т. 29. № 3. С. 101–110. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.66.40.010>
21. Волкова Л.В. Совершенствование систем качества в строительстве на основе цифровых технологий // Известия вузов. Строительство. 2023. № 9. С. 68–79. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-68-79>
22. Романова Е.В., Магера Т.Н. Цифровые технологии в подготовке строителей: социальное взаимодействие в отрасли // Сметно-договорная работа в строительстве. 2022. № 2. С. 59–64. <https://doi.org/10.33920/str-01-2202-09>
23. Almujiabah H. Assessment of building information modeling (BIM) as a time and cost-saving construction management tool: evidence from two-story villas in Jeddah. *Sustainability*. 2023; 15(9): 7354. <https://doi.org/10.3390/su15097354>

24. Kumar B. Building Information Modeling: Road to 2016. *International Journal of 3-D Information Modeling*. 2012; 1(4): 1–7. <http://doi.org/10.4018/ij3dim.2012100101>
25. Casini M. Extended reality for smart building operation and maintenance: a review. *Energies*. 2022; 15(10): 3785. <https://doi.org/10.3390/en15103785>
26. Chiu W.-B. Building information modeling application in engineering design performance prediction. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2022; 11(1): 28–34. <https://doi.org/10.18178/ijscer.11.1.28-34>
27. Zhou X., Wang M., Liu Y.-S., Wang Q., Guo M., Zhao J. Heterogeneous network modeling and segmentation of building information modeling data for parallel triangulation and visualization. *Automation in Construction*. 2021; 131: 103897. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103897>
28. Rahla Rabia M.P., Sathish Kumar D., Farooq J., Pachauri R.K. Applications of Building Information Modeling for COVID-19 spread assessment due to the organization of building artifacts. *Data Science for COVID-19*. 2022; 2: 319–333. <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-90769-9.00009-8>
29. Taher A.H., Elbeltagi E.E. Integrating building information modeling with value engineering to facilitate the selection of building design alternatives considering sustainability. *International Journal of Construction Management*. 2023; 23(11): 1886–1901. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.2021465>
30. Halmetoja E. The conditions data model supporting building information models in facility management. *Facilities*. 2019; 37(7/8): 484–501. <https://doi.org/10.1108/F-11-2017-0112>
31. Abdel-Tawab M., Kineber A.F., Chileshe N., Abanda H., Ali A.H., Almkhtar A. Building information modelling implementation model for sustainable building projects in developing countries: a PLS-SEM approach. *Sustainability*. 2023; 15(12): 9242. <https://doi.org/10.3390/su15129242>
32. Skrzypczak I., Oleniacz G., Leśniak A., Zima K., Mrówczyńska M., Kazak J.K. Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. *Building Research & Information*. 2022; 50(8): 859–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2011703>
33. Rashdi R., Martínez-Sánchez J., Arias P., Qiu Z. Scanning technologies to building information modelling: a review. *Infrastructures*. 2022; 7(4): 49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040049>
34. Nap M.-E., Chiorean S., Cira C.-I., Manso-Callejo M.-Á., Păunescu V., Șuba E.-E., Sălăgean T. Non-destructive measurements for 3D modeling and monitoring of large buildings using terrestrial laser scanning and unmanned aerial systems. *Sensors*. 2023; 23(12): 5678. <https://doi.org/10.3390/s23125678>
35. Kartini G.A.J., Saputri N.D. 3D Modeling of Bosscha Observatory with TLS and UAV integration data. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 2022; 9(1): 37–46. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.9.1.37-46>
36. Ibrahimkhil M.H., Shen X., Barati K., Wang C.C. Dynamic progress monitoring of masonry construction through mobile SLAM mapping and as-built modeling. *Buildings*. 2023; 13(4): 930. <https://doi.org/10.3390/buildings13040930>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рада Артём Олегович – кандидат экономических наук, директор Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, rada.ao@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7678-8402>

Кузнецов Александр Дмитриевич – директор Центра геодезии, аэрофотосъемки и кадастровых работ Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, adkuz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1986-3039>

Акулов Анатолий Олегович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента им. И.П. Поварича Института экономики и управления Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, akuanatolij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2301-7943>

Коньков Николай Юрьевич – ведущий программист отдела разработок Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, n.konkov@i-digit.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3817-4893>

ВКЛАД АВТОРОВ

Рада А.О. – написание разделов «Введение», «Заключение»; общее научное руководство.

Кузнецов А.Д. – написание раздела «Результаты и обсуждение»; организация работ по наземному и воздушному лазерному сканированию.

Акулов А.О. – написание раздела «Методы и материалы»; подготовка списка источников.

Коньков Н.Ю. – проведение экспериментальной части исследования; разработка и программная реализация вычислительных алгоритмов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601>

CC BY 4.0

Production of polycrystalline silicon by chlorination from rice husk and purification of chlorine-containing gases by adsorption method

Zhanbolot K.Aidaraliev^{1*} , Imilya A.Rysbaeva¹ , Bekbolot kyzy Baktygul² , Mairam K.Chimchikova¹ ,
Rashid kyzy Burulcha³ 

¹ Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

² Department of industrial property objects expertise, Bishkek, Kyrgyzstan

³ Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

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

ABSTRACT: Introduction. In the article we analysed the technology for producing silicon from rice husks. The analysis showed that the production of polycrystalline and amorphous silicon based on rice waste in the form of rice husk solves the simultaneous disposal of rice waste. Rice husk processing produces valuable organic products, and the residual solid waste mainly contains silicon, carbon and other trace metal elements. Therefore, obtaining silicon and silicon-containing materials from rice husk is relevant. **Methods and materials.** Various methods for obtaining silicon from rice husk are given. Among them, the methods of chlorination and sublimation were chosen, and experimental installations were assembled to conduct the experiment. The object of study was samples obtained from rice husks of Uzgen rice in the Kyrgyz Republic. **Results.** The composition and structure of rice husks for the production of crystalline silicon were studied. Lime milk was used to purify toxic chlorine-containing gases in the air of the working area and atmospheric air. The condensing system, designed to capture volatile chlorides, has two receivers. In the first receiver at a temperature of 60°C, condensation of iron, aluminum and magnesium chlorides occurs. It has been established that highly volatile silicon (IV) chloride (SiCl_4) at a given temperature remains in the gaseous phase and is completely distilled off in the next receiver of the refrigerator. This indicates that the silicon is in the form of SiCl_4 (60°C) and condenses only at a lower temperature in the next receiver. The data obtained indicate that when the temperature rises to 200°C, the process of chlorination of metal compounds initiates. The optimal conditions for maximum extraction of metals and silicon tetrachloride from rice husk were identified: temperature 500–550°C and time 120 minutes. Non-volatile chlorides of calcium, sodium, potassium and other elements form a floating mixture at 450°C. During the reaction, metal chlorides harden and settle on the cold walls of the reactor. Therefore, at this temperature there is not enough heat to maintain them in a gaseous state, and they condense to form solid precipitates. Lime milk containing $\text{CaO} - 130 \text{ g/dm}^2$ is a very effective and cheap means for purifying toxic chlorine-containing gases in the air of the working area and atmospheric air. At high temperatures (1050–1100°C), it is possible to activate chemical reactions between the carrier gas (hydrogen) and silicon chloride (SiCl_4), which promotes the decomposition of SiCl_4 into components, including silicon and hydrogen chloride, and also provides certain conditions for the formation and deposition silicon crystals. **Conclusion.** A technology for producing polycrystalline silicon by chlorination from rice husks of Uzgen rice of the Kyrgyz Republic has been studied and developed.

KEYWORDS: crystalline silicon, rice husk, chlorination, macroelements, purification, sublimation, carrier, chlorination rate, semiconductor, milk of lime, adsorption, kinetics.

FOR CITATION: Aidaraliev Z.K., Rysbaeva I.A., Bekbolot kyzy B., Chimchikova M.K., Rashid kyzy B. Production of polycrystalline silicon by chlorination from rice husk and purification of chlorine-containing gases by adsorption method. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(6): 592–601. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601>. – EDN: SAVFFB.

INTRODUCTION

Silicon and its compounds are a material that has an extremely wide range of useful properties: electronic,

electrical, anti-corrosion; due to this, it is increasingly being introduced into technology. To date, silicon has been successfully used in a large number of semiconductor devices, such as thermistors, penzodensors, photore-

© Aidaraliev Z.K., Rysbaeva I.A., Bekbolot kyzy B., Chimchikova M.K., Rashid kyzy B., 2023

sistors and photocells for recording ultraviolet radiation, etc. [1].

One of the options for the production technology of polycrystalline silicon is presented in the reference [2], where a heat balance analysis was performed. As a result, it was concluded that the main parameter affecting the temperature in the reactor is the wall temperature.

An analysis of existing technological schemes for producing silicon for photoelectric converters (PVCs) was carried out. The results of an experiment to increase the efficiency of silicon-based elements are presented; as a result of research by the authors [3], it was found that increasing the efficiency of solar cells is possible due to the predominant use of silicon single crystals with a complex of new properties.

The article [4] shows the results of a porous silicon study obtained from various types of silicon-containing plant raw materials by the method of magnesium-thermal reduction of silicon dioxide at a temperature of 650°C in an argon atmosphere.

A literature review on the utilization of rice husks inorganic portions revealed a significant increase in the number of publications on this topic over the past 20 years. This growth is associated with the undisputed leadership of rice as the leading grain crop and an increase in the volume of waste generated during its processing. However, these wastes cannot always be effectively used as complete feed, fertilizer or fuel sources. Thus, researchers are now increasingly looking for new methods for recycling the inorganic portion of rice husks. One of the interesting directions was the study of the silicon carbide producing possibility from these materials. Silicon carbide has a wide range of applications, especially as a raw material for the production of ceramics and new generation refractories [5].

A new and promising source of raw material for the production of silicon and its carbide is rice husk, which contains, along with the organic part, silicon oxide with a mass content of 93%. In [6], a technological scheme for processing rice husks was developed, aimed at obtaining products: amorphous silicon dioxide, cellulose fibrous residue, and the possibility of extracting alkali lignin. The estimated level of profitability of the proposed technology is 30%.

Work [7] presents the results of a study of heat treatment of rice husk samples. During this work, heat treatment was carried out at various temperatures, as well as treatment with hydrochloric acid. The results obtained made it possible to identify the main relationships between the heat treatment process and the characteristics of the samples under study.

To select optimal conditions for preliminary heat treatment, a study was carried out on the firing process at the temperature range from 20 to 500°C of starting materials [8]. It is important to note that a certain amount of

active carbon is retained in the material. According to the literature, chlorination in the presence of reducing agents such as coal has long attracted the attention of researchers.

The works [9, 10] determined the optimal conditions for silicon chlorination, the degree of chlorination depending on temperature, time, chlorine supply rate and degree of grinding of the starting material, etc.

There are different opinions regarding the mechanism of the chlorination reaction, especially the interaction with reducing agents. Some researchers suggest that the initially introduced reducing agents react with the oxides, reducing them to a state of lower valence or even to a metallic state. The resulting reaction products then react with chlorine. Other authors believe that chlorine reacts with oxides, displacing oxygen from compounds. In this case, the role of the reducing agent is reduced to binding the released oxygen and removing it from the reaction area.

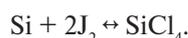
Rice husk, unlike mineral silicon-containing raw materials, has a stable composition and low content of heavy metals, which is very important for the synthesis of solar silicon. The ability to be used as a raw material to produce silicon that is purer than that obtained from minerals has made rice husk an attractive natural raw material. In addition, rice husks are a source of cellulose and lignin. Cellulose obtained from rice husk can be used as a substrate for nanomodified dressings and medical preparations with reduced toxicity and high prolongation [11].

Silicon dioxide and silica from rice husks are of particular interest as components for producing adsorbents based on them. The chemical stability of these objects, high thermal stability, and the ability to regulate the porosity of the structure provide prospects for creating adsorbents and carriers with a high specific surface area based on them [12].

The problem of obtaining silicon with the complex processing of rice husks indeed remains poorly studied. In this regard, the main goal of our research was to obtain polycrystalline silicon from rice husk, which is a waste product from rice production.

METHODS AND MATERIALS

The iodide method of obtaining pure metals, widely used in technology, is used to isolate the purest silicon. It is based on a reversible reaction [10]:



The equilibrium of this reaction in the temperature range 750–850°C is almost completely shifted towards the formation of tetraiodide; at temperatures around 1000–1200°C, thermal dissociation of SiI_4 occurs. The production of metal titanium, niobium, tantalum, zirconium, hafnium, rare earth metals, germanium, and silicon is based on the use of chlorine gas [13].

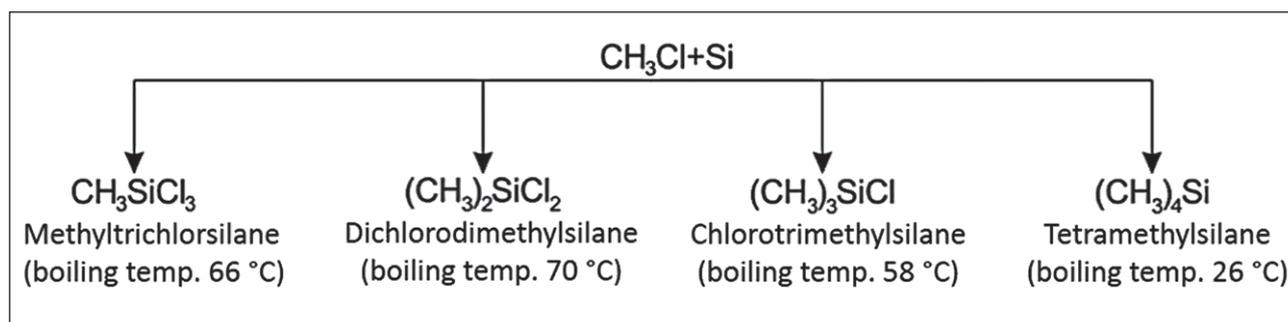
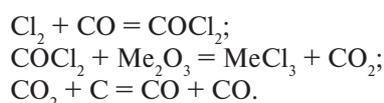


Fig. 1. Alkylchlorosilane derivatives with various boiling temperatures

According to V.I. Stytsin, the acceleration of the chlorination process in the presence of coal is because of carbon doubles one of the reaction products with chlorine, which, in turn, continuously shifts the equilibrium of the reaction.

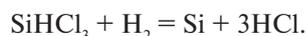
As noted by N.I. Timokhina, coal in a reaction of this type acts together with chlorine and reaction products, as an active principle capable of chlorinating oxides, salts and minerals. These active reagents include carbon tetrachloride, which is Morozov’s extremely active chlorinating agent:



Recently, the chlorine method has been widely used in non-ferrous metallurgy to extract rare and trace elements, including gold and silver. The chlorine method is especially effective for opening refractory ores in which gold and silver are in a finely dispersed condition [14].

In industry, at temperatures from 300 to 850°C, alkylchlorosilanes are obtained by treating a mixture of silicon and copper which is acting as a catalyst (Fig. 1).

The process of trichlorosilane reduction with hydrogen occurs at a temperature of 1000–1100°C [15]:



The chloride sublimation method was used to isolate pure components from mixtures by separating and condensing volatile chloride compounds (Fig. 2).

The remained amorphous silicon is dried and further used to obtain crystalline silicon. To obtain it, it is nec-

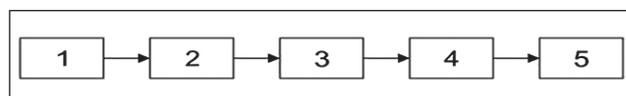


Fig. 2. Chloride sublimation: 1 – reactor (quartz tube), 2 – condenser, 3 – refrigerator, 4 – receiver, 5 – calcium chloride tube

essary to use the most effective gas flow method using SiCl_4 , the vapors of which are transferred by hydrogen or argon (hydrogen was obtained using a Kipp apparatus using the reaction: $\text{Zn} + \text{HCl} = \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2 \uparrow$) as shown in Figure 3.

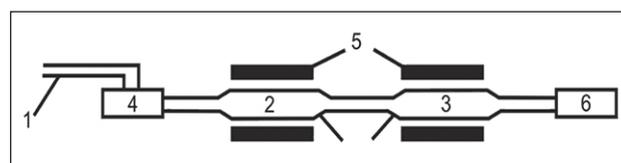


Fig. 3. Hardware and technological diagram of a laboratory installation for deep purification and crystallization of silicon: 1 – gas carrier; 2 – substance to be purified; 3 – purified substance; 4 – transport substance (SiCl_4); 5 – electric furnaces; 6 – Migunov aspirator (compressor)

During the extraction of metals and purification of semiconductor elements, a certain amount of toxic chlorine-containing gases is released. Therefore, we investigated the sorption capacity of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) when washing chlorine-containing gases and in a laboratory installation for cleaning silicon.

The hardware and technological diagram of the laboratory installation (Fig. 4) includes an absorption tube 6, 7, which is a cylindrical glass vessel. This vessel is equipped with a porous gas-permeable partition in the lower part, which creates conditions for the uniform distribution of the chlorine gas mixture entering through the tubes into the bottom of the absorption tube.

The supply of gas from below ensures intensive mixing of the calcium hydroxide, preventing separation of the suspension during the experiment.

Chlorine-containing gases come from a reactor in which semiconductor elements are purified from metals.

For the quantitative analysis of active chlorine during the purification of chlorine-containing gases using calcium hydroxide and its saturated solution $\text{Ca}(\text{OH})_2$, titrimetric, gravimetric methods and express analysis using UG-2 (universal gas analyzer) were used.

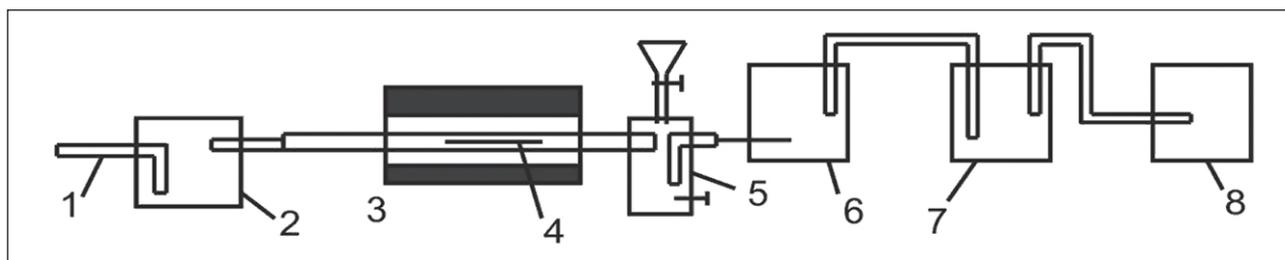
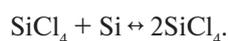
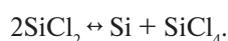


Fig. 4. Hardware and technological diagram of a laboratory installation for determining the sorption capacity of an absorption liquid: 1 – pipe for air intake; 2 – container with carbon tetrachloride; 3 – tube furnace; 4 – reactor with sample; 5 – pipe; 6-7 – absorbers with calcium hydroxide; 8 – Migunov aspirator

The ampoule method can also be used to clean silicon. In this method, 3–4 grams of silicon are placed in ampoules, which are filled with chlorine. Then 1–2 drops of SiCl_4 or a small amount of water crystals are introduced into the ampoule. The end of the ampoule with silicon is heated to 1100°C . At this temperature, a reaction occurs between SiCl_4 and silicon:



When the temperature decreases to 900°C , SiCl_2 disproportionates:



When an ampoule with a lower temperature is used, the rate of silicon transport slows down significantly, and the purification process takes several hours [16].

Scanning electron microscopy of all samples was carried out using the following shooting parameters: accelerating voltage is 15 keV, working distance is ≈ 10 mm.

All samples were secured with double-sided carbon tape. All measurements were carried out in high vacuum mode 10^{-3} Pa, samples surface Images were obtained.

RESULTS

The composition and structure of rice husk ash from Uzgen rice is shown in Fig. 5 and 6.

The process of low-temperature chlorination is based on a reaction in which oxide forms of metals react with a gas mixture of chlorine and phosgene vapor (COCl_2). In the presence of chlorine, metal oxide compounds in the gas mixture undergo an exchange reaction; silicon chloride and chlorides of macroelements (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na) are formed in the areas of the raw material under study:

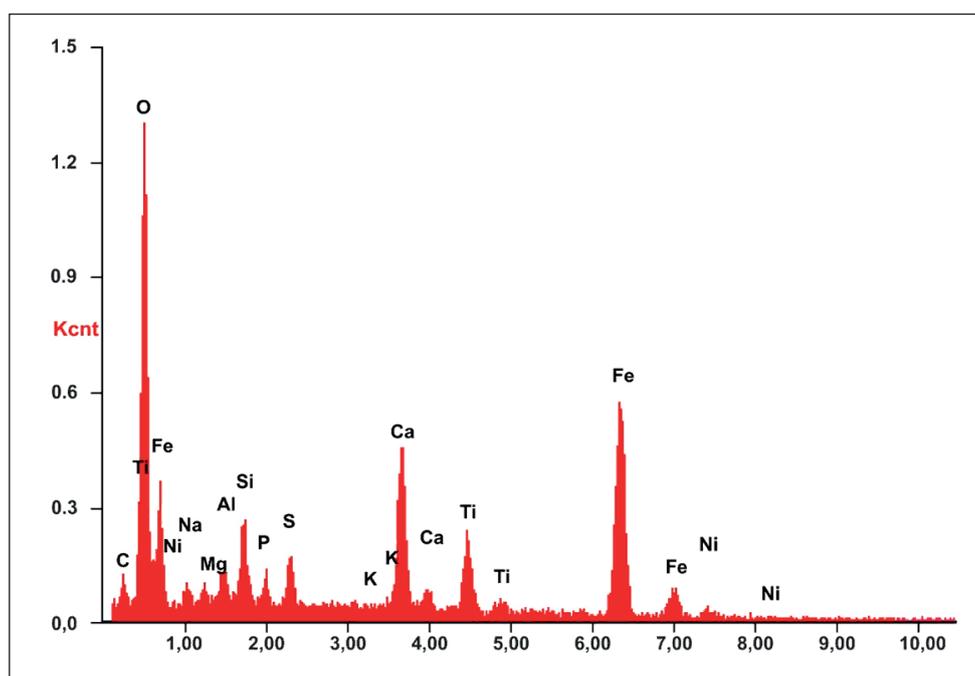


Fig. 5. EDS spectrum of rice husk ash samples

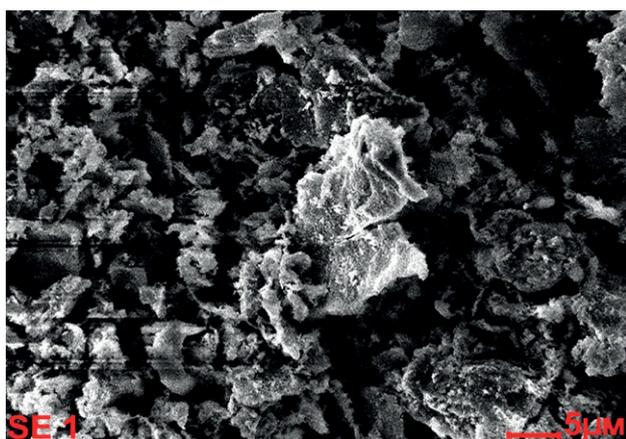


Fig. 6. Electronic photograph of the rice husk ash

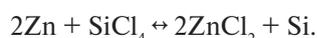
1. $2K_2O + COCl_2 + 2HCl = 4KCl + CO_2 + H_2O$;
2. $2Na_2O + COCl_2 + 2HCl = 4NaCl + CO_2 + H_2O$;
3. $2MgO + COCl_2 + 2HCl = 2MgCl_2 + CO_2 + H_2O$;
4. $2CaO + COCl_2 + 2HCl = 2CaCl_2 + CO_2 + H_2O$;
5. $Fe_2O_3 + 2COCl_2 + 2HCl = 2FeCl_2 + 2CO_2 + H_2O$;
6. $Al_2O_3 + 2COCl_2 + 2HCl = 2AlCl_3 + CO_2 + H_2O$;
7. $SiO_2 + COCl_2 + 2HCl = SiCl_4 + CO_2 + H_2O$.

These reactions demonstrate the process of chlorination of metal oxide forms in the presence of $COCl_2$ and HCl . In this case, volatile chlorides ($MgCl_2$, $FeCl_2$, $AlCl_3$) are formed, which condense in the cold part of the reactor. Non-volatile chlorides of calcium ($CaCl_2$), sodium ($NaCl$) and potassium (KCl) have a higher melting point. This means they form a melting mixture at $490^\circ C$ and the remainder of the process can be processed and valuable products recovered.

The residue after chlorination, containing illiquid chlorides and other reaction products, is leached with water. During leaching, calcium chlorides and alkali metal chlorides go into solution. Liquid silicon tetrachloride ($SiCl_4$) and its vapor are cooled in a refrigerator and collected in a receiver.

Thorough purification of silicon by the diffusion-transport method was carried out by heating it in $SiCl_4$ vapor and the minimum operating temperature was $850\text{--}900^\circ C$. At higher temperatures, a significant portion of the processed silicon could interact with its tetrachloride and be transferred as a result of the reaction to the cold walls of the tube.

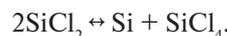
During such purification, there is a significant reduction in the aluminum content in aluminothermic silicon, as well as zinc in silicon obtained by reduction with zinc:



The most effective is the gas method using $SiCl_4$, the vapors of which are carried by hydrogen or argon. In this

case, the carrier gas (Ar , H_2) must be slowly pumped through the $SiCl_4$ to avoid $SiCl_4$ vapors slipping through the silicon being purified.

However, this method has a drawback: during the disproportionation reaction of $SiCl_2$, $SiCl_4$ is again formed according to the following reaction:



This may reduce the effectiveness of the method, since $SiCl_4$ will be returned to the purification process. The amount of non-chlorinated part of the original sample is determined. This residue was analyzed for the following elements: calcium, sodium, potassium, iron, aluminum, magnesium and silicon. The composition of the residue was then analyzed and the overall recovery of these components as a result of the chlorination process was calculated. The results of the experiments are shown in Table 1–3.

Table 1
Effect of temperature on the degree of chlorination of metal oxides and silicon

Elements compounds	Processing temperature, °C	Sublimation, %	Residues, %
Fe_2O_3	350	99.9	0.1
SiO_2	360	99.8	0.2
Al_2O_3	380	97.9	2.1
Na_2O	450	–	100
K_2O	450	0.1	99.9
CaO	450	–	100
MgO	520	82.5	17.5

Table 2
Effect of time on the degree of chlorination of metal oxides and silicon

Elements compounds	Chlorination time, min	Sublimation, %	Residues, %
Fe_2O_3	120	0.1	99.9
SiO_2		–	100
Al_2O_3		0.2	99.8
Na_2O		–	100
K_2O		–	100
CaO		–	100
MgO		0.5	99.5

Table 3

The influence of chlorine supply rate on the degree of chlorination of silicon oxide and the production of silicon (IV) chloride

Experiment No.	Chlorine consumption g/hour	Sublimation, %		Residue, %	
		SiCl ₄		SiO ₂	
1	12	SiCl ₄	96.4	SiO ₂	3.6
2	24	SiCl ₄	99.8	SiO ₂	0.2
3	36	SiCl ₄	100	SiO ₂	–

In the course of experimental studies, we found that during the recovery of rice husk ash, it is divided into silicon tetrachloride and metal chlorides (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na). It has also been found that the reduction reaction is highly dependent on several parameters such as coal content, temperature, time and chlorine feed rate, and these factors have a significant impact on the recovery rate of the feedstock [13, 17].

The resulting highly volatile silicon chlorides SiCl₄ in the liquid state were condensed in a receiver with a temperature of 60°C. Volatile metal chlorides (Al, Fe, Mg) sublimed and condensed in the wide part of the condenser, and non-volatile calcium, sodium, and potassium chlorides formed a melting mixture at a temperature of 450°C in the reactor. At the end of the reaction, non-volatile chlorides were removed from the reaction zone by aqueous treatment and obtained in the form of a melt.

The results of metals (Fe, Al, Mg, Ca, Na, K) and silicon chlorination in a chlorine gas mixture of carbon tetrachloride and air depending on temperature and time are shown in Figures 7 and 8 [13, 17].

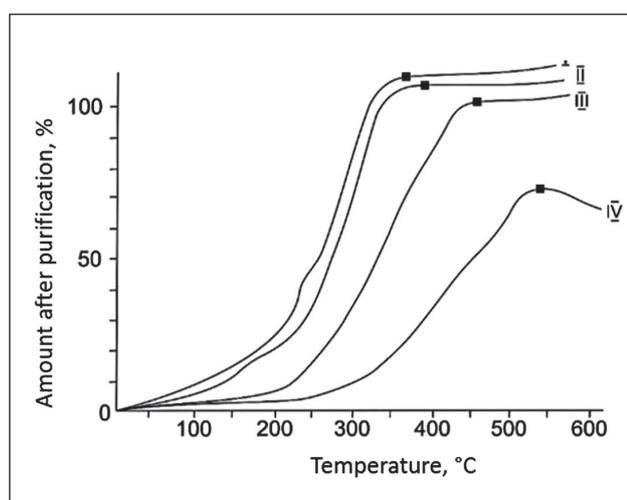


Fig. 7. Chlorination of metals and silicon depending on the temperature

DISCUSSION

Iron chlorination begins with the formation of volatile chlorides at a temperature of 350°C. At these temperature, aluminum and magnesium do not sublime. Aluminum is chlorinated and sublimated at a temperature of 380°C, magnesium at a temperature of 520°C, and silicon at a temperature of 360°C. The degree of chlorination of iron, aluminum, magnesium and silicon increases greatly with increasing temperature, at a temperature of 550°C and amounts to 99.9%, 97.9%, 82.5% and 99.9%, respectively. To reduce silicon (IV) chloride at a temperature of 950–1000°C, it is necessary to carry out the following reactions:

- $2Zn + SiCl_4 \rightarrow 2ZnCl_2 + Si$;
- $2Mg + SiCl_4 \rightarrow 2MgCl_2 + Si$.

In these reactions, metals are removed in the form of volatile chloride and deposited on the cold walls of the reactor, while amorphous silicon remains in the elevated temperature zone of the reactor. The remain-

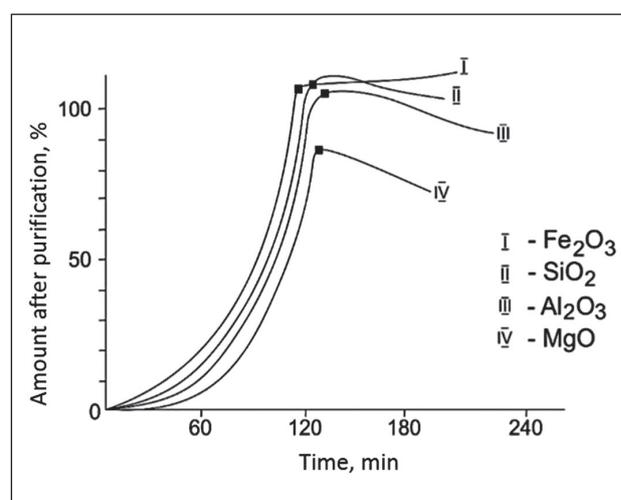
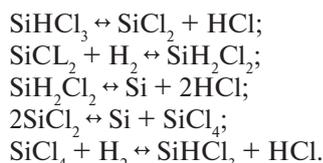


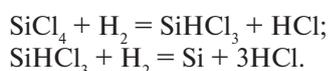
Fig. 8. Chlorination of metals and silicon depending on time

ing silicon after reduction is leached with hot distilled water, and metal chlorides pass into the solution during leaching.

Amorphous silicon is placed in the first compartment of the installation. We slowly pass the carrier gas (H_2) through liquid $SiCl_4$ so that there is no leakage of $SiCl_4$ vapor through the silicon being purified. We heat the electric furnace to up 1050–1100°C.



The overall equation for the main reactions is:



Exothermic reactions are characterized by the movement of a substance flow from a zone with a higher temperature (T_2) to a zone with a lower temperature (T_1), where $T_2 > T_1$. In the case of endothermic reactions, the reverse movement is observed: the flow of substance goes from a zone with a lower temperature (T_1) to a zone with a higher temperature (T_2), where $T_2 > T_1$.

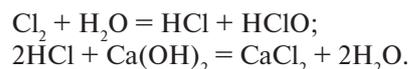
When carrying out the reactions, by-products of trichlorosilane, polysilane, and chlorides are formed. Let's consider methods for purifying silicon chlorides with silica gel and a 30% solution of potassium hydroxide.

In addition to the gas flow method, the silicon purification process is also performed using the diffusion-transport method, which involves heating silicon in $SiCl_4$ vapor. In this method, the cleaning temperature is maintained in the range of 830–900°C.

Given the higher temperature, a significant proportion of silicon interacts with silicon tetrachloride and is transferred through a transport reaction to the cold part of the wall of the tubular reactor.

To purify chlorine-containing gases, calcium hydroxide with a CaO content of 130 g/dm^3 was used as an adsorbent in one series of experiments; in another series, lime water was used (saturated solution of $Ca(OH)_2$ of 1.4 g/dm^3). In each experiment of one series, the initial chemical capacity of the absorption liquid remained constant. The initial $CaCl_2$ content in the absorption liquid varied from 0 to 335 g/dm^3 . This range of $CaCl_2$ concentration changes corresponds to the values that have been previously established by numerous studies for the change in $CaCl_2$ concentration in circulating lime milk in a laboratory gas treatment.

The formation of $CaCl_2$ occurs through chemisorption of gases HCl and Cl_2 :



The experimental results are presented in Figure 9 in the form of the dependence of the concentration of calcium hydroxide (curves 1, 2) and lime water (curve 3) on the initial content of $CaCl_2$ in them, which characterizes their sorption capacity for chlorine. Curve 1 corresponds to the appearance of traces of Cl_2 breakthrough, curve 2 to the complete absorption of bubbled Cl_2 .

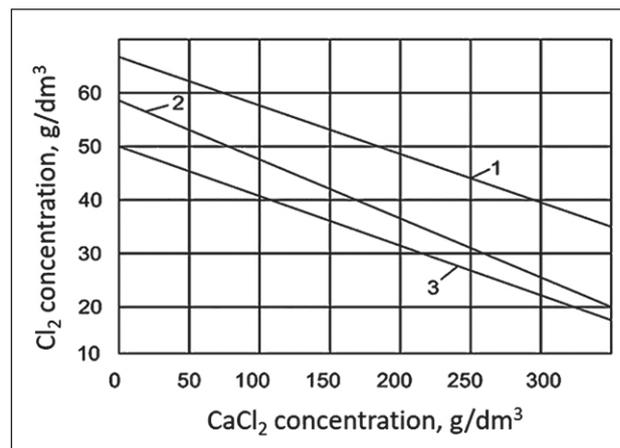


Fig. 9. Dependence of the sorption capacity of calcium hydroxide on the initial content of calcium chloride in them: 1 – traces of chlorine leakage through the volume of calcium hydroxide; 2 – complete (100%) capture of chlorine by calcium hydroxide; 3 – traces of chlorine breakthrough through the volume of calcium hydroxide

Above curve 1 there is an area in which gas purification to sanitary standards is not ensured, below curve 2 there is an area of complete purification (100%) of the chlorine gas mixture. Based on the results of a series of experiments with calcium hydroxide, curve 3, similar to curve 1, was obtained.

Analysis of these data allows us to conclude that with an increase in the initial content of $CaCl_2$, the amount of Cl_2 that can absorb calcium hydroxide significantly decreases, while maintaining the ability to purify the chlorine-gas mixture to sanitary standards (curve 2). For example, the amount of Cl_2 decreases from 57 g/dm^3 (in the absence of $CaCl_2$) to 22 g/dm^3 (with 335 g/dm^3 $CaCl_2$). There is also a noticeable decrease in the Cl_2 content to traces of breakthrough (curve 1) at the outlet of the reactor – from 65 g/dm^3 (in the absence of $CaCl_2$) to 28 g/dm^3 (at 335 g/dm^3 $CaCl_2$). For lime water, the corresponding values are 2.8 g/dm^3 and 0.8 g/dm^3 , respectively.

The general technological scheme for obtaining crystalline silicon from rice husk is shown in Figure 10.

The chemical composition of rice husks before and after chemical treatments shown in Table 4.

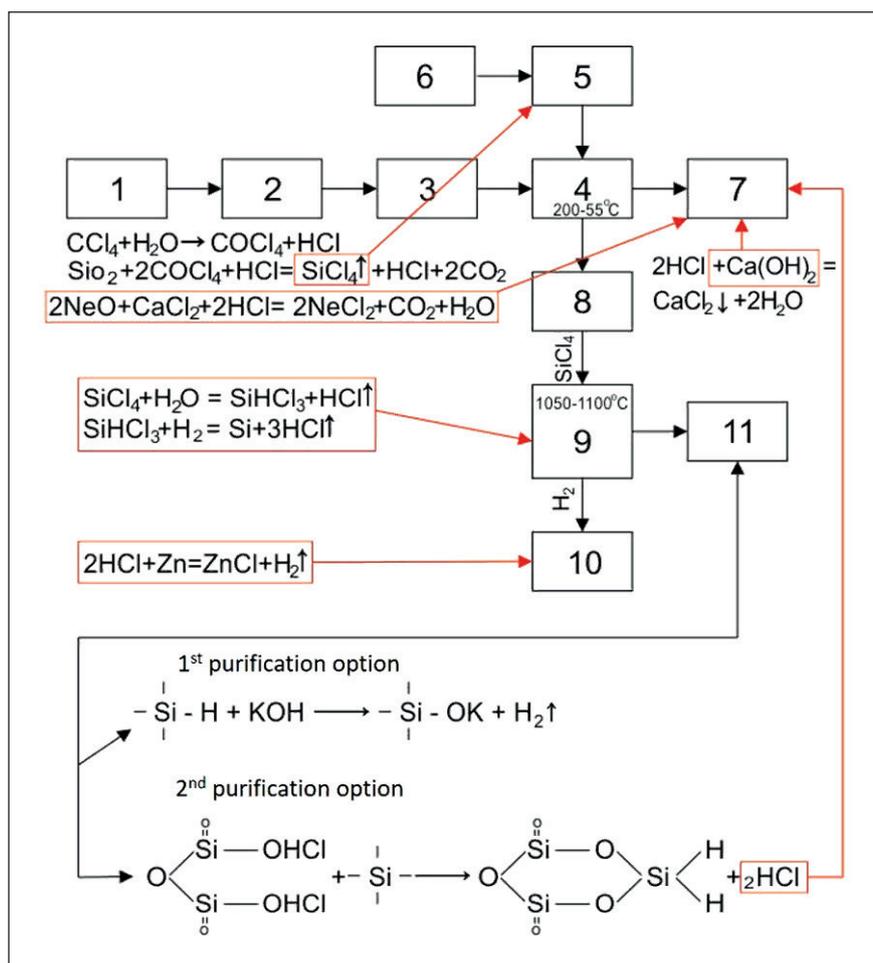


Fig. 10. General technological scheme for obtaining crystalline silicon from rice husks: 1 – mechanical cleaning and washing of rice husks; 2 – drying rice husk; 3 – roasting rice husks; 4 – tubular furnace for chlorination of rice husk ash; 5 – container for carbon tetrachloride; 6 – mini compressor for blowing carbon tetrachloride (SiCl_4); 7 – adsorption column for purification of chlorine-containing gases with Ca(OH)_2 solution (plumbing unit); 9 – electric furnace for deep purification of silicon and production of crystalline silicon; 10 – instrumentation apparatus for hydrogen production; 11 – column for purification of by-products (silica gel, KOH, HCl)

Table 4

Chemical composition of rice husk

Metall compounds	SiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3
Rice husk before treatment	30	0.18	0.12	0.32	0.2	0.5	0.5
Metals	Si	K	Na	Ca	Mg	Fe	Al
Rice husk after treatment	99.65	0.02	0.04	0.12	0.11	0.04	0.02

CONCLUSION

1. The composition and structure of rice husk ash was studied to obtain polycrystalline silicon. It has been established that the supply rate of the chlorine gas mixture (phosgene and hydrogen chloride) for the chlorination of metal oxides is $2.5 \text{ cm}^2/\text{min}$ at various temperature ranges (200, 300, 400, 550°C).

2. It was discovered that during this process toxic chlorine-containing gases with a characteristic fishy odor are released in the air of the working area and atmospheric air, exceeding the maximum permissible concentration (MPC). If the salt content in lime milk is more than 355 g/dm^3 , it is necessary to replace the solution for purifying technical gases. Therefore, lime milk with a CaO content of 130 g/dm^3 is an effective

and economical means for purifying toxic chlorine-containing gases in the working area and atmospheric air.

3. A technological scheme for producing polycrystalline silicon from rice husks using the chlorination method has been developed.

REFERENCES

1. Noshelsky A.Ya. *Production of semiconductor materials*. Metallurgy; 1989. 210 p.
2. Ermolaev A.A. *Silicon in agriculture*. M: 1992; 253 p.
3. Vlasov A.S., Zakharov A.I., Sarkisyan O.A., Lukosheva N.A. Preparation of silicon carbide from rice husk processing products. *Fireproof materials*. 1991; 10 (15-17).
4. Sharikov V.I., Spotnitsky S.A. and others. *Technology of hydrolysis production*. M: Timber industry. 1973; P. 403.
5. Ismanov E.M., Tashpolotov I.T., Omurbekova G.K., Aidaraliev Zh.K., Sadykov E.S. Technology for producing silicon using organic and inorganic raw materials. *Science and new technologies*. Bishkek: 2001; 1: 22-24.
6. Ugai Y.A. *Introduction to semiconductor chemistry*. M: Higher School; 1965. 333 p.
7. Gorichev I.G., Zaitsev B.E., Kipryanov N.A., Gromov D.N. *Guide to inorganic synthesis*. M.; "Chemistry". 1997. 319 p.
8. Morozov I.S. *The use of chlorine in metallurgy or rare non-ferrous metals*. M: The science; 1966. P. 252.
9. Handbook ed. L.A. Oshina. *Industrial organochlorine products*. M: The science; 1976. 646 p.
10. Senotova S. A. Mathematical model of the process of producing polycrystalline silicon. *Bulletin of ISTU*. 2013; 10 (81): 239-241.
11. Bekbolot kyzy B., Murzubraimov B.M. Problems of utilization of rice waste and prospects for their use. *News of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*. 2010; 3: 128-131.
12. Bekbolot kyzy B. Preparation of silicon dioxide nanoparticles from rice husks. Bekbolot kyzy B. *Bulletin of KGUSTA*. 2014; 1(43):142-145.
13. Ismanov E.M., Omurbekova G.K., Baydolotov R.R., Tashpolotov I.T. Study of optimal conditions for chlorination of silicon in rice husks. *Science and new technologies*. 2003; 3:39-40.
14. Popov V.M. *Organic chemistry*. M: Education; 1976. P. 163.
15. Syman A.D., Yablonsky A.P., Kashko I.A., Girel K.V., Bondarenko A.V. Structural properties of porous silicon particles formed by magnesium-thermal reduction of silicon dioxide made from silicon-containing plants. *Reports of BSUIR*. 2016; 1 (95): 19-25.
16. Usubakunov M.U., Chukulova U.E., Bleshinsky S.V. Complex processing of antimony and pyrite concentrates containing noble metals by chlorination with carbon tetrachloride. *Science and new technologies*. 2000; 2:102-104.
17. Ismanov E.M., Omurbekova G.K., Baydolotov R.R., Tashpolotov I.T. Kinetics of low-temperature chlorination of metal oxides and silicon in rice husks. *Science and new technologies*. 2013; 3: 20-22.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhanbolot K. Aidaraliev – Cand. Sci., Professor, Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Imilya A. Rysbaeva – Cand. Sci., Professor Assistant, Director the Institute of Technology, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, imiyla@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4481-2732>

Baktygul Bekbolot kyzy – Cand. Sci., Head researcher, Department of industrial property objects expertise, Expertise office, Bishkek, Kyrgyzstan, bekbolotkyzy75@mail.ru, <https://orcid.org/009-0005-8998-3334>

Mairam K. Chimchikova – Professor Assistant, Department of consumer goods manufacturing industry technology, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, mchimchikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0096-8930>

Rashid kyzy Burulcha – Lecturer at the Department of Applied Informatics and Information Security, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, burulcha9090@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7785-6861>

RESEARCH RESULTS OF SCIENTISTS AND SPECIALISTS

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Zhanbolot K. Aidaraliev – scientific management; research concept.

Imilya A. Rysbaeva – concept of the study; scientific editing of the text; final conclusions.

Baktygul Bekbolot kyzy – collection of material from literary sources.

Mairam K. Chimchikova – carrying out the experimental part.

Rashid kyzy Burulcha – participation in development of curricula and their implementation.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 06.12.2023.

Научная статья

УДК 546+547

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601>

CC BY 4.0

Получение поликристаллического кремния хлорированием из рисовой шелухи и очистки хлорсодержащих газов адсорбционным методом

Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев^{1*} , Имильа Акимжановна Рысбаева¹ , Бактыгул Бекболот кызы² , Майрам Камчибековна Чимчикова¹ , Бурулча Рашид кызы³ 

¹ Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

² Кыргызпатент, Бишкек, Кыргызская Республика

³ Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Во введении приведен анализ технологии получения кремния из рисовой шелухи. Анализ показал, что получение поликристаллического и аморфного кремния на основе отходов риса в виде рисовой шелухи решает одновременно утилизации рисовых отходов. В ходе переработки рисовой шелухи получают ценные органические продукты, кроме того, остаточные твердые отходы, в основном, содержат кремний, углерод и другие микроэлементы металлов. Поэтому получение кремния и кремнийсодержащих материалов из рисовой шелухи актуально. **Методы и материалы.** Приведены различные методы получения кремния из рисовой шелухи. Среди них были выбраны методы хлорирования и возгонки, для проведения эксперимента собраны экспериментальные установки. В качестве объекта исследования взяты образцы, полученные из рисовой шелухи узгенского риса в Кыргызской Республики. **Результаты.** Исследованы состав и структура рисовой шелухи для получения кристаллического кремния. Для очистки токсических хлорсодержащих газов в воздухе рабочей зоны и атмосферном воздухе было использовано известковое молоко. В конденсационной системе, предназначенной для улавливания летучих хлоридов, есть два приемника. В первом приемнике при температуре 60°C происходит конденсация хлоридов железа, алюминия и магния. Установлено, что легколетучий хлорид кремния (IV) (SiCl_4) при данной температуре остается в газообразной фазе и полностью отгоняется в следующем приемнике холодильника. Это указывает на то, что кремний в виде SiCl_4 (60°C) и конденсируется только при более низкой температуре в следующем приемнике. Полученные данные свидетельствуют, при повышении температуры до 200°C происходит инициация процесса хлорирования соединений металлов. Выявлены оптимальные условия для максимального извлечения металлов, выяснено, что для тетраоксида кремния из рисовой шелухи ими являются температура 500–550°C и время 120 мин. Нелетучие хлориды кальция, натрия, калия и других элементов при 450°C образуют плавающую смесь. В процессе реакции хлориды металлов твердеют и оседают на холодных стенках реактора. Следовательно, при этой температуре недостаточно тепла для поддержания их в газообразном состоянии, и они конденсируются, образуя твердые осадки. Известковое молоко с содержанием CaO – 130 г/дм³ является очень эффективным и дешевым средством для очистки токсических хлорсодержащих газов в воздухе рабочей зоны и атмосферном воздухе. При высоких температурах (1050–1100°C) возможно активирование химических реакций между газом-переносчиком (водородом) и хлоридом кремния (SiCl_4), что способствует разложению SiCl_4 на компоненты, включая кремний и хлорид водорода, а также обеспечивает определенные условия для образования и отложения кристаллов кремния. **Заключение.** Исследована и разработана технология получения поликристаллического кремния методом хлорирования из рисовой шелухи узгенского риса Кыргызской Республики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кристаллический кремний, рисовая шелуха, хлорирование, микроэлементы, очистка, сублимация, носитель, скорость хлорирования, полупроводник, известковое молоко, адсорбция, кинетика.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Айдаралиев Ж.К., Рысбаева И.А., Бекболот кызы Б., Чимчикова М.К., Рашид кызы Б. Получение поликристаллического кремния хлорированием из рисовой шелухи и очистки хлорсодержащих газов адсорбционным методом // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 6. С. 592–601. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601>. – EDN: SAVFFB.

ВВЕДЕНИЕ

Кремний и его соединения являются материалами с широким спектром полезных свойств, включая электронные, электротехнические и антикоррозионные. Благодаря этим свойствам он находит все больше применений в технике. В настоящее время кремний успешно используется во множестве полупроводниковых устройств, таких как терморезисторы, пензодатчики, фоторезисторы и фотоэлементы для регистрации ультрафиолетового излучения и др. [1].

В работе [2] приведен один из вариантов технологии производства поликристаллического кремния. Был выполнен анализ теплового баланса. В результате был сделан вывод, что основным параметром, влияющим на температуру в реакторе, является температура стенки.

Проведен анализ технологических схем получения кремния для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Экспериментальные результаты, представленные в работе [3], подтвердили возможность повышения КПД элементов на кремнии. Авторы пришли к выводу, что увеличение эффективности ФЭП достижимо благодаря преимущественному использованию монокристаллов кремния с новым комплексом свойств.

В статье [4] показаны результаты исследования по пористому кремнию, полученные из различных видов кремнийсодержащего растительного сырья методом магнийтермического восстановления диоксида кремния при температуре 650°C в атмосфере аргона.

Обзор литературы по утилизации неорганической части рисовой шелухи указывает на значительный рост исследований за последние 20 лет. Это связано с преобладающей ролью риса в мировом сельском хозяйстве и увеличением объемов отходов, производимых в процессе его переработки. Эти отходы не всегда могут быть полноценно использованы в качестве кормов, удобрений или топливных источников. Таким образом, исследователи активно стремятся разработать новые методы утилизации неорганической части рисовой шелухи. Одним из интересных направлений в этой области стало изучение возможностей получения карбида кремния из этих материалов. Карбид кремния предлагает широкий спектр применений, особенно в качестве сырья для производства керамики и огнеупоров нового поколения [5].

Исследования показывают, что рисовая шелуха может стать новым и перспективным источником сырья для получения кремния и его карбида. В составе шелухи, помимо органической части, присутствует оксид кремния с массовым содержанием 93%. В исследовании [6] была разработана технологиче-

ская схема переработки рисовой шелухи, ориентированная на производство следующих продуктов: аморфного диоксида кремния, целлюлозного волокнистого остатка. Данная схема также предоставляет возможность извлечения щелочного лигнина. Расчетный уровень рентабельности предложенной технологии составляет 30%.

Работа [7] представляет результаты исследования термообработки образцов рисовой шелухи. В ходе этой работы была проведена термическая обработка при различных температурах, а также обработка соляной кислотой. Полученные результаты позволили выявить основные зависимости между процессом термообработки и характеристиками исследуемых образцов.

Для выбора оптимальных условий предварительной термообработки было проведено исследование процесса обжига в диапазоне температур от 20 до 500°C исходных материалов [9]. Важно отметить, что при этом в материале сохраняется определенное количество активного углерода. Согласно литературным источникам, давно привлекает внимание исследователей хлорирование в присутствии восстановителей, таких как уголь.

В работах [9, 10] определены оптимальные условия хлорирования кремния, степени хлорирования в зависимости от температуры, времени, скорости подачи хлора и степени измельчения исходного материала и др.

Существуют различные мнения относительно механизма реакции хлорирования, особенно взаимодействия с восстановителями. Одни авторы предполагают, введенные восстановители взаимодействуют с оксидами в начальной стадии процесса, восстанавливая их до соединений с более низкой валентностью или даже до металлического состояния. После этого полученные в результате восстановления продукты реакции могут вступать в химическую реакцию с хлором. Другие исследователи утверждают, что хлор начинает реагировать с оксидами, вытесняя кислород из соединений. В этом контексте роль восстановителя заключается в связывании выделившегося кислорода и выводе его из зоны реакции.

Рисовая шелуха, в отличие от минерального кремнийсодержащего сырья, обладает стабильным составом и низким содержанием тяжелых металлов, что является важным фактором для синтеза солнечного кремния. Возможность использования рисовой шелухи в качестве сырья для производства более чистого кремния по сравнению с минералами делает ее привлекательным природным материалом. Кроме того, рисовая шелуха содержит целлюлозу и лигнин, что расширяет ее потенциальное применение. Целлюлоза, полученная из рисовой шелухи, может применяться в качестве подложки для наномодифици-

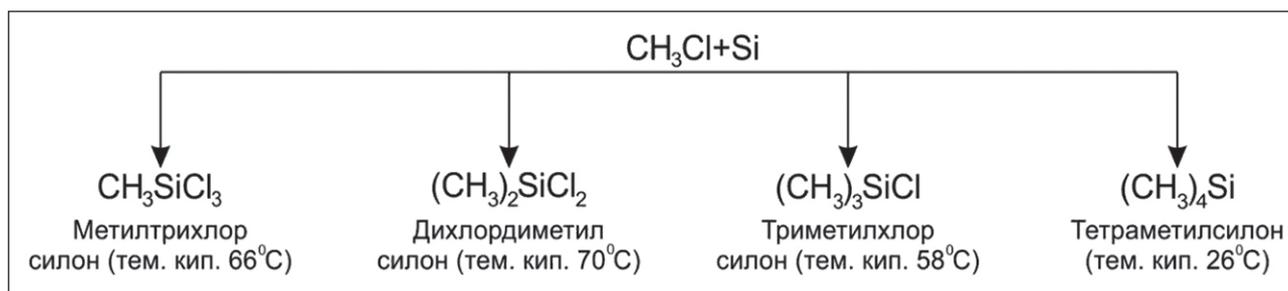


Схема 1

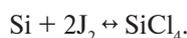
рованных перевязочных материалов и медицинских препаратов с пониженной токсичностью и высокой пролонгацией [11].

Диоксид кремния и кремнеуглерод из рисовой шелухи вызывают особый интерес для использования в качестве адсорбентов. Химическая устойчивость этих объектов, высокая термостойкость, возможность регулирования пористости структуры дают перспективы для создания на их основе адсорбентов и носителей с высокой удельной поверхностью [12].

Данное утверждение означает, что проблема получения кремния из рисовой шелухи с использованием комплексного метода обработки пока недостаточно исследована. В свете этого основной целью проводимого исследования является получение поликристаллического кремния из рисовой шелухи. Таким образом, рисовая шелуха, представляющая собой отход от производства риса, становится объектом изучения с целью выявления возможностей ее использования в производстве кремниевых материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Широко распространенный в технике йодидный способ получения чистых металлов применяется для выделения чистейшего кремния. Он основан на обратимой реакции [10]:



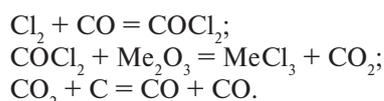
Равновесие этой реакции в интервале температур $750\text{--}850^\circ\text{C}$ практически полностью сдвинуто в сторону образования тетраиодида; при температурах около $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ происходит термическая диссоциация SiI_4 .

Производство металлического титана, ниобия, тантала, циркония, гафния, редкоземельных металлов, германия и кремния осуществляется с использованием газообразного хлора [13].

По мнению Стыцина В.И., ускорение процесса хлорирования при наличии угля объясняется тем, что углерод дополнительно реагирует с хлором, об-

разуя соединения, которые влияют на равновесие химической реакции.

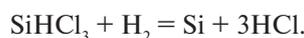
Как отмечено Тимохиной Н.И., в ходе реакции уголь выполняет роль активного инициатора в сочетании с хлором и продуктами реакции как активное начало, способное хлорировать оксиды, соли и минералы. К числу таких активных реагентов следует отнести четыреххлористый углерод, являющийся чрезвычайно эффективным хлорирующим агентом Морозова:



В последнее время хлорный метод широко используется в цветной металлургии для извлечения редких и рассеянных элементов, включая золото и серебро. Хлорный метод оказывается особенно эффективным при обработке упорных руд, где золото и серебро присутствуют в мелкодисперсном состоянии [14].

В промышленности при температурах от 300 до 850°C путем обработки смеси кремния и меди (причем медь действует как катализатор) происходит получение алкилхлорсиланов (схема 1).

Процесс восстановления трихлорсилана водородом протекает при температуре $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ [15]:



Применен метод хлоривозгонка для выделения чистых компонентов из смесей путем разделения и конденсации летучих хлоридных соединений (рис. 1).

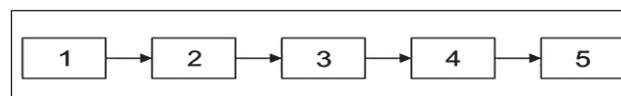


Рис. 1. Хлоривозгонка: 1 – реактор (кварцевая трубка), 2 – конденсатор, 3 – холодильник, 4 – приемник, 5 – хлоркальциевая трубка

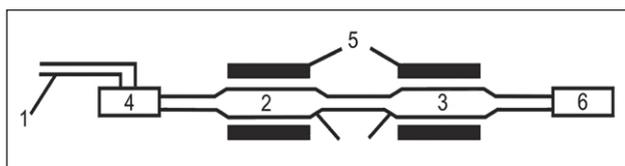


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема лабораторной установки по глубокой очистке и кристаллизации кремния: 1 – газопереносчик; 2 – очищаемое вещество; 3 – очищенное вещество; 4 – транспортное вещество (SiCl_4); 5 – электропечи; 6 – аспиратор Мигунова (компрессор)

Остаток аморфного кремния высушивается и применяются далее для получения кристаллического кремния. Для этого необходимо применять наиболее эффективный газопоточный способ с использованием SiCl_4 , пары которого переносятся водородом или аргоном (водород получали с помощью аппарата Киппа с применением реакции: $\text{Zn} + \text{HCl} = \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2 \uparrow$)

В процессе извлечения металлов и очистки полупроводниковых элементов выделяется определенное количество токсических хлорсодержащих газов. Поэтому нами была исследована сорбционная способность известкового молока при отмывке хлорсодержащих газов и лабораторной установке при очистке кремния.

Аппаратурно-технологическая схема лабораторной установки (рис. 3) включает поглотительную пробирку 6, 7, которая представляет собой цилиндрический стеклянный сосуд. Этот сосуд оснащен пористой газопроницаемой перегородкой в нижней части, создающей условия для равномерного распределения хлоргазовой смеси, поступающей через трубки в днище поглотительной пробирки.

Поступление газа снизу обеспечивает интенсивное перемешивание известкового молока, предотвращающее расслоение суспензии в течение опыта.

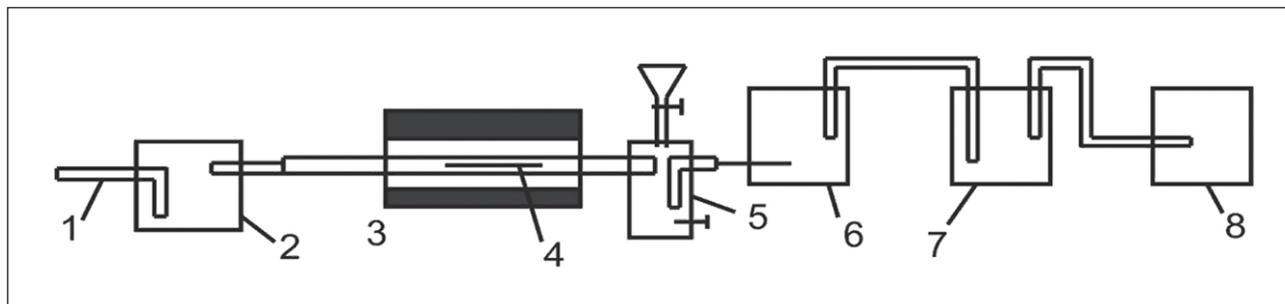


Рис. 3. Аппаратурно-технологическая схема лабораторной установки по определению сорбционной способности поглотительной жидкости: 1 – патрубка для поступления воздуха; 2 – емкость с четыреххлористым углеродом; 3 – трубчатая печь; 4 – реактор с пробой; 5 – патрубок; 6–7 – поглотители с известковым молоком; 8 – аспиратор Мигунова

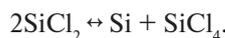
Хлорсодержащие газы поступают из реактора, в котором происходит очистка полупроводниковых элементов от металлов.

Для количественного анализа активного хлора при очистке хлорсодержащих газов с использованием известкового молока и насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ были применены титриметрический, гравиметрический методы и экспресс-анализ с использованием УГ-2 (универсального газоанализатора).

Для очистки кремния также может быть использован ампульный метод. В этом методе 3–4 грамма кремния помещают в ампулы, которые заполняют хлором. Затем в ампулу вводят 1–2 капли SiCl_4 или небольшое количество кристаллов воды. Конец ампулы с кремнием нагревают до 1100°C . При данной температуре происходит реакция между SiCl_4 и кремнием:



При снижении температуры до 900°C SiCl_2 диспропорционирует:



Когда используется ампула с более низкой температурой, скорость транспорта кремния существенно замедляется, и процесс очистки проводится в течение нескольких часов [16].

Сканирующая электронная микроскопия всех образцов проводилась при следующих параметрах съемки:

Ускоряющее напряжение: 15 keV;

Рабочее расстояние: ≈ 10 мм.

Все образцы были закреплены на двусторонний углеродный скотч. Все измерения проводились в режиме высокого вакуума 10^{-3} Па. Были получены изображения поверхности образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав и структура золы рисовой шелухи узгенского риса Кыргызстана отражены на рис. 4 и 5.

Процесс низкотемпературного хлорирования основан на реакции, при которой оксидные формы металлов взаимодействуют с газовой смесью хлора и паров фосгена (COCl_2). Под воздействием хлора оксидные соединения металлов в газовой смеси претерпевают реакцию обмена. В зонах обработки исследуемого сырья образуются хлорид кремния и хлориды макроэлементов (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na):

1. $2\text{K}_2\text{O} + \text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 4\text{KCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
2. $2\text{Na}_2\text{O} + \text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 4\text{NaCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
3. $2\text{MgO} + \text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 2\text{MgCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
4. $2\text{CaO} + \text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 2\text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
5. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 2\text{FeCl}_2 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
6. $\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = 2\text{AlCl}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;
7. $\text{SiO}_2 + \text{COCl}_2 + 2\text{HCl} = \text{SiCl}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Эти реакции демонстрируют процесс хлорирования оксидных форм металлов в присутствии COCl_2 и HCl . При этом образуются летучие хлориды (MgCl_2 , FeCl_2 , AlCl_3), которые конденсируются в холодной части реактора. Действительно, нелетучие хлориды кальция (CaCl_2), натрия (NaCl) и калия (KCl) обладают более высокой температурой плавления по сравнению с другими веществами. Это указывает на то, что при достижении определенной температуры 490°C эти хлориды могут образовывать

смесь, которая становится жидкой, то есть они плавятся и образуют плавящуюся смесь.

Остаток после хлорирования, содержащий неликвидные хлориды и другие продукты реакции, выщелачивается водой. При выщелачивании хлориды кальция и хлориды щелочных металлов переходят в раствор. Жидкий тетрахлорид кремния (SiCl_4) и его пары охлаждаются в холодильнике и собираются в приемнике.

Тщательную очистку кремния диффузионно-транспортным способом проводили путем его нагревания в парах SiCl_4 , и минимальная рабочая температура составляла $850\text{--}900^\circ\text{C}$. При более высокой температуре значительная часть обрабатываемого

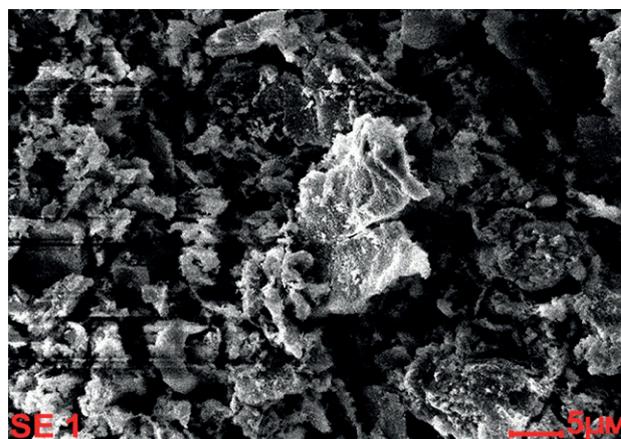


Рис. 5. Электронный снимок золы рисовой шелухи

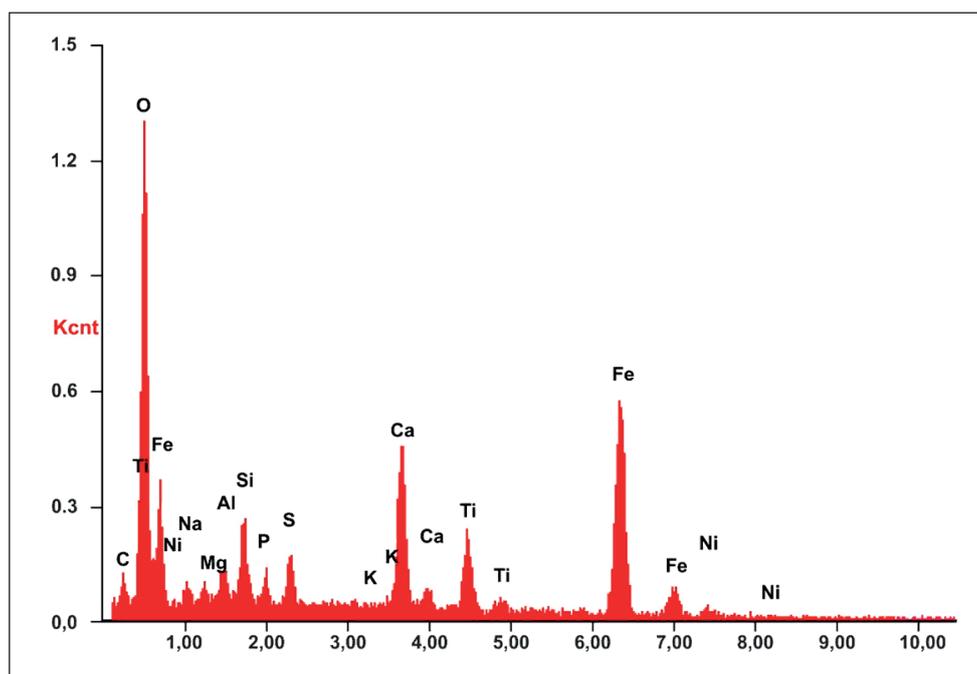
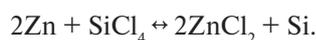


Рис. 4. EDS-спектр образцов золы рисовой шелухи

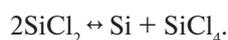
кремния могла взаимодействовать с его тетрахлоридом и переноситься в результате реакции к холодным стенкам трубки.

В ходе такой очистки происходит значительное снижение содержания алюминия в алюмотермическом кремнии, а также цинка в кремнии, полученного путем восстановления цинком:



Наиболее эффективным является газовый метод с использованием SiCl_4 , пары которого переносятся водородом или аргоном. При этом газ-переносчик (Ar , H_2) должен медленно прокачиваться через SiCl_4 , чтобы избежать проскальзывания паров SiCl_4 через очищаемый кремний.

Однако у этого метода есть недостаток: в ходе реакции диспропорционирования SiCl_2 снова образуется SiCl_4 по следующей реакции:



Это может снизить эффективность метода, так как SiCl_4 будет возвращаться в процесс очистки.

Производится определение количества непрохлорированной части исходной пробы. Полученный остаток подвергается анализу для определения содержания следующих элементов: кальция, натрия, калия, железа, алюминия, магния и кремния. Затем проводится анализ состава остатка, и рассчитывается общая степень извлечения указанных компонентов в результате процесса хлорирования.

Результаты опытов проведены в табл. 1–3.

Результаты наших экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что в процессе восстановления золы рисовой шелухи происходит разделение на тетрахлорид кремния и хлориды металлов (Al , Fe , Ca , Mg , K , Na). Также было установлено, что скорость реакция восстановления зависит от содержания угля, температуры, времени и скорость подачи хлора и эти факторы оказывают значительное влияние на степень извлечения исходного сырья [13, 17].

В результате хлорирования произошло образование легколетучих хлоридов кремния SiCl_4 . Эти хлориды, находясь в газообразном состоянии, конденсировались в приемнике с температурой 60°C ,

Таблица 1

Влияние температуры на степень хлорирования окиси металлов и кремния

Соединение элементов	Температура обработки, °C	Возгонка, %	Остатки, %
Fe_2O_3	350	99,9	0,1
SiO_2	360	99,8	0,2
Al_2O_3	380	97,9	2,1
Na_2O	450	—	100
K_2O	450	0,1	99,9
CaO	450	—	100
MgO	520	82,5	17,5

Таблица 2

Влияние времени на степень хлорирования окиси металлов и кремния

Соединение элементов	Время хлорирования в мин.	В возгонке, %	В остатке, %
Fe_2O_3	120	0,1	99,9
SiO_2		—	100
Al_2O_3		0,2	99,8
Na_2O		—	100
K_2O		—	100
CaO		—	100
MgO		0,5	99,5

переходя в жидкую фазу. Летучие хлориды металлов (Al , Fe , Mg) были возгонены, то есть нагреты до температуры, при которой они переходят в газообразное состояние, и затем конденсировались в широкой части конденсатора.

В то время как нелетучие хлориды кальция, натрия и калия образовали плавящую смесь при более высокой температуре, равной 450°C , внутри реактора, в конце реакции нелетучие хлориды были выделены путем водной обработки и получены в виде расплава.

Таблица 3

Влияние скорости подачи хлора на степень хлорирования окиси кремния и получение хлорида кремния (IV)

№ опыта	Расход хлора в г/час	В возгонке, %		В остатке, %	
1	12	SiCl_4	96,4	SiO_2	3,6
2	24	SiCl_4	99,8	SiO_2	0,2
3	36	SiCl_4	100	SiO_2	—

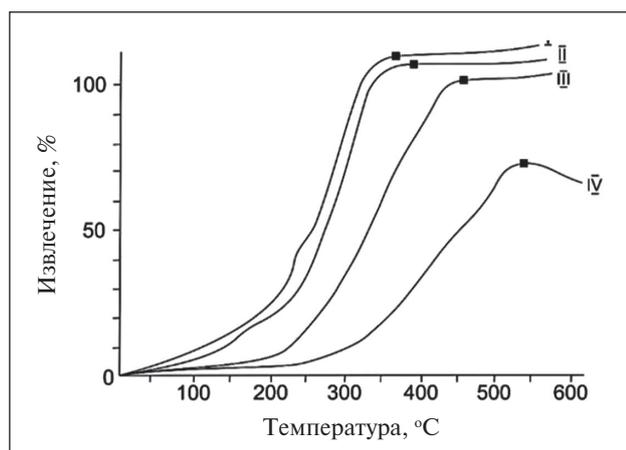


Рис. 6. Хлорирование металлов и кремния в зависимости от температуры

Графики на рис. 6 и 7 отображают результаты процесса хлорирования металлов (Fe, Al, Mg, Ca, Na, K) и кремния в газовой смеси, содержащей четыреххлористый углерод и воздух. Эти результаты представлены в зависимости от изменения температуры и времени проведения процесса [13, 17].

Для железа начало хлорирования при 350°C происходит в виде летучих хлоридов. При 550°C степень хлорирования достигает 99,9%. Для восстановления хлорида кремния (SiCl_4) при температуре 950–1000°C предполагается проведение соответствующих реакций восстановления. Алюминий возгоняется при температуре 380°C, а при 550°C степень хлорирования составляет 97,9%. Для магния температура хлорирования 520°C, при 550°C степень хлорирования равна 82,5%. Кремний (Si) – начало хлорирования при 360°C, при 550°C степень хлорирования достигает 99,9%

Эти данные свидетельствуют, что при повышении температуры увеличивается степень хлорирования каждого металла, достигая высоких значений при 550°C.

Для восстановления хлорида кремния (IV) при температуре 950–1000°C, необходимо осуществить следующие реакции:

1. $2\text{Zn} + \text{SiCl}_4 \rightarrow 2\text{ZnCl}_2 + \text{Si}$;
2. $2\text{Mg} + \text{SiCl}_4 \rightarrow 2\text{MgCl}_2 + \text{Si}$.

В этих реакциях металлы удаляются в виде летучего хлорида и оседают на холодных стенках реактора, а аморфный кремний остается в зоне с повышенной температуры реактора. Остаток кремния после восстановления выщелачивается горячей дистиллированной водой, а в раствор при выщелачивании переходят хлориды металлов.

Аморфный кремний помещаем в первое отделение установки. Газ-переносчик (H_2) медленно пропускаем через жидкий SiCl_4 , чтобы не было проскока

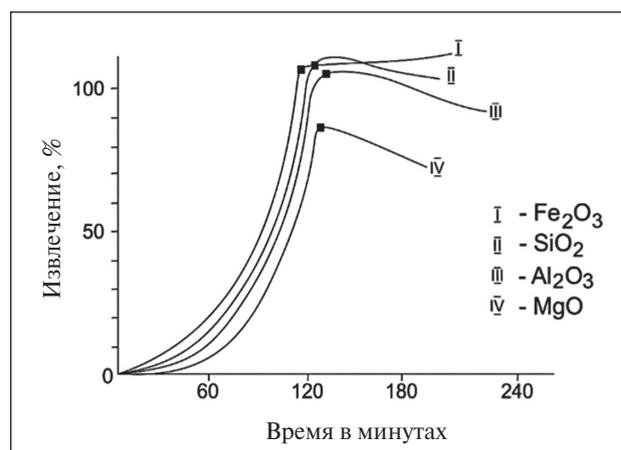
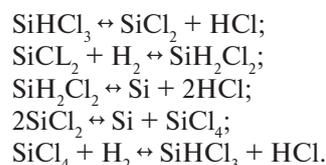


Рис. 7. Хлорирование металлов и кремния в зависимости от времени

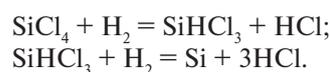
паров SiCl_4 через очищаемый кремний. Электрод печь нагреваем до 1050–1100°C.

При этой температуре в присутствии водорода SiCl_4 вступает в реакцию с аморфным кремнием.

Во второй части установки (холодная часть) кремний кристаллизуется в виде блестящих тонких игл, на основе следующих процессов:



Суммарное уравнение основных реакций имеет вид:



Для экзотермических реакций характерно движение потока вещества от зоны с более высокой температурой (T_2) к зоне с более низкой температурой (T_1), где $T_2 > T_1$. В случае эндотермических реакций наблюдается обратное движение: поток вещества идет от зоны с более низкой температурой (T_1) к зоне с более высокой температурой (T_2), где $T_2 > T_1$.

При проведении реакций образуются побочные продукты трихлорсилана, полисилан, хлориды. Рассмотрим методы очистки хлоридов кремния с силикагелем и 30% ным раствором едкого калия.

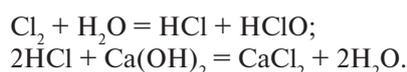
Помимо газопоточного метода, процесс очистки кремния также выполняется с использованием диффузионно-транспортного метода, который включает нагревание кремния в парах SiCl_4 . В данном методе температура очистки поддерживается в диапазоне 830–900°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

С учетом более высокой температуры, значительная доля кремния взаимодействует с тетрахлоридом кремния и переносится через транспортную реакцию к холодной части стенки трубчатого реактора.

Для очистки хлорсодержащих газов в качестве адсорбента применяли в одной серии опытов известковое молоко с содержанием CaO 130 г/дм³; в другой серии использовали известковую воду (насыщенный раствор Ca(OH)₂ 1,4 г/дм³). В каждом опыте одной серии начальная химическая емкость поглотительной жидкости оставалась постоянной. Исходное содержание CaCl₂ в поглотительной жидкости изменялось в пределах от 0 до 335 г/дм³. Этот диапазон изменения концентрации CaCl₂ соответствует тем значениям, которые были предварительно установлены многочисленными исследованиями для изменения концентрации CaCl₂ в циркулирующем известковом молоке на лабораторной газоочистке.

Образование CaCl₂ идет путем хемосорбции газов HCl и Cl₂:



Результаты экспериментов представлены на рис. 8 в виде зависимости концентрации известкового молока (кривые 1, 2) и известковой воды (кривая 3) от начального содержания в них CaCl₂,

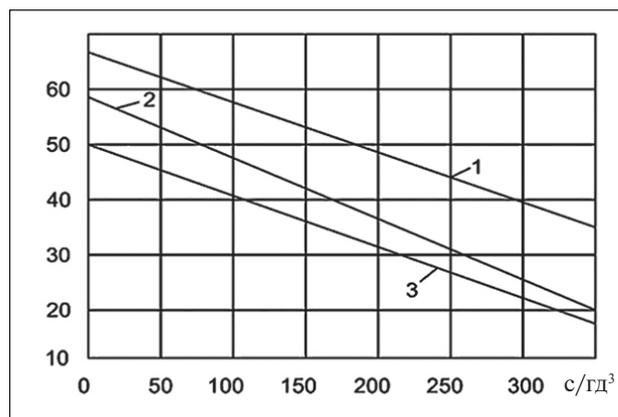


Рис. 8. Зависимость сорбционной способности известкового молока и известковой воды от начального содержания в них хлорида кальция: 1 — следы проскока хлора через объем известкового молока; 2 — полное (100 %) улавливание хлора известковым молоком; 3 — следы проскока хлора через объем известковой воды

которые характеризуют их сорбционную способность по хлору. Кривая 1 соответствует появлению следов проскока Cl₂, кривая 2 — полному поглощению барботируемого Cl₂.

Выше кривой 1 расположена область, при которой не обеспечивается очистка газа до санитарных

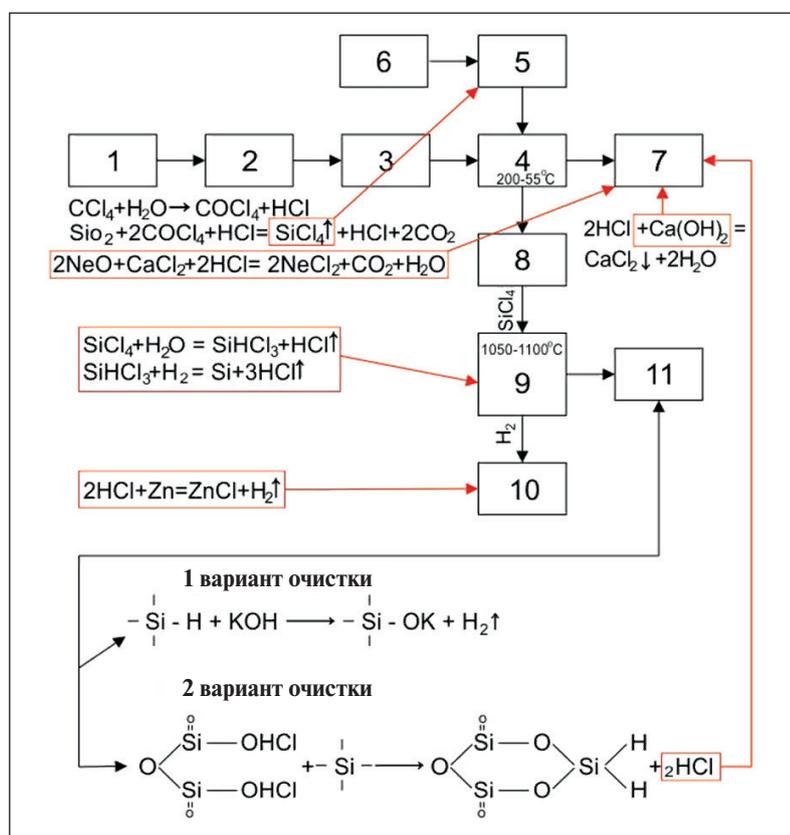


Рис. 9. Общая технологическая схема получения кристаллического кремния из рисовой шелухи: 1 — механическая очистка и промывка рисовой шелухи; 2 — сушка рисовой шелухи; 3 — обжиг рисовой шелухи; 4 — трубчатая печь для хлорирования золы рисовой шелухи; 5 — емкость для четыреххлористого углерода; 6 — мини-компрессор для продувания четыреххлористого углерода (SiCl₄); 7 — адсорбционная колонка для очистки хлорсодержащих газов с раствором Ca(OH)₂ (сантехническая узел); 9 — электропечь глубокой очистки кремния и получение кристаллического кремния; 10 — аппарат КИПа для получения водорода; 11 — колонна для очистки побочных продуктов (силикагель, KOH, HCl)

Таблица 4

Химический состав рисовой шелухи

Соединение металлов	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Рисовая шелуха до обработки	30	0,18	0,12	0,32	0,2	0,5	0,5
Металлы	Si	K	Na	Ca	Mg	Fe	Al
Рисовая шелуха после обработки	99,65	0,02	0,04	0,12	0,11	0,04	0,02

норм, ниже кривой 2 – область полной очистки (100%) хлора-газовой смеси. По результатам серии опытов с известковой водой получена кривая 3, аналогичная кривой 1.

Анализ этих данных позволяет сделать вывод, что с увеличением начального содержания CaCl₂ значительно уменьшается количество Cl₂, которое способно поглотить известковое молоко, при этом сохраняя способность к очистке хлор-газовой смеси до санитарных норм (кривая 2). Например, количество Cl₂ снижается с 57 г/дм³ (при отсутствии CaCl₂) до 22 г/дм³ (при 335 г/дм³ CaCl₂). Также заметно снижение содержания Cl₂ до следов проскока (кривая 1) на выходе из реактора – с 65 г/дм³ (при отсутствии CaCl₂) до 28 г/дм³ (при 335 г/дм³ CaCl₂). Для известковой воды соответствующие значения составляют 2,8 г/дм³ и 0,8 г/дм³ соответственно.

Общая технологическая схема получения кристаллического кремния из рисовой шелухи показаны на рис. 9.

В табл. 4 приведен химический состав рисовой шелухи до и после химической обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован состав и структура золы рисовой шелухи для получения поликристаллического кремния. Установлено, что скорость подачи хлоргазовой смеси (фосген и хлористый водород) на хлорирование окислов металлов составляет 2,5 см²/мин при различных интервалах температур (200, 300, 400, 550°C). Обнаружено, что при этом процессе выделяются токсические хлорсодержащие газы с характерным запахом рыбы в воздухе рабочей зоны и атмосферном воздухе, превышая предельно допустимую концентрацию (ПДК). При содержании солей в известковом молоке более 355 г/дм³ необходимо провести замену раствора для очистки технических газов. Поэтому известковое молоко с содержанием CaO в объеме 130 г/дм³ является эффективным и экономичным средством для очистки токсичных хлорсодержащих газов в рабочей зоне и атмосферном воздухе. Разработана технологическая схема получения поликристаллического кремния из рисовой шелухи методом хлорирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ношельский А.Я. Производства полупроводниковых материалов // Металлургия. 1989. 210 с.
2. Ермолаев А.А. Кремний в сельском хозяйстве. – М., 1992. – 253 с.
3. Власов А.С., Захаров А.И., Саркисян О.А., Лукошева Н.А. Получения карбида кремния из продуктов переработки рисовой шелухи // Огнеупоры. – 1991. – № 10. – С. 15–17.
4. Шариков В.И., Спотницкий С.А. и др. Технология гидролизных производств. – М.: Лесная промышленность. 1973. – 403 с.
5. Ысманов Э.М., Ташполотов И.Т., Омурбекова Г.К., Айдаралиев Ж.К., Садыков Э.С. Технология получения кремния с использованием органических и неорганических сырьевых ресурсов // Наука и новые технологии. – Бишкек. № 1. 2001. – С. 22–24.
6. Угай Я.А. Введение в химию полупроводников // Изд. «Высшая школа», М., 1965. 333 с.
7. Горичев И.Г., Зайцев Б.Е., Кипрянов Н.А., Громов Д.Н. Руководство по неорганическому синтезу. М.: Химия. 1997. 319 с.
8. Морозов И.С. Использование хлора в металлургии или редких цветных металлах. М.: Наука. 1966. С. 252.
9. Справочник под ред. Л.А. Ошина. Промышленная хлорорганическая продукция. М.: Наука. 1976. 646 с.
10. Сенотова С.А. Математическая модель процесса производства поликристаллического кремния. Вестник ИрГТУ. 2013. 10 (81):239-241.

11. Бекболот кызы Б., Мурзубраимов Б.М. Проблемы утилизации рисовых отходов и перспективы их использования. Новости Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2010. 3:128-131.
12. Бекболот кызы Б. Получение наночастиц диоксида кремния из рисовой шелухи. Бекболот кызы Б. Вестник КГУСТА. 2014. 1(43):142-145.
13. Исманов Э.М., Омурбекова Г.К., Байдолотов Р.Р., Ташполотов И.Т. Исследование оптимальных условий хлорирования кремния в рисовой шелухе. Наука и новые технологии. 2003. 3:39-40.
14. Попов В.М. Органическая химия. М.: Образование. 1976. С. 163.
15. Сыман А.Д., Яблонский А.П., Кашко И.А., Гирель К.В., Бондаренко А.В. Структурные свойства пористого кремния частицы, образующиеся в результате магниево-термического восстановления диоксида кремния, получаемого из кремнийсодержащих растений. Отчеты БГУИР. 2016. 1(95):19-25.
16. Усубакунов М.Ю., Чукулова У.Е., Блешинский С.В. Комплексная переработка сурьмяно-пиритовых концентратов содержащие благородные металлы путем хлорирования четыреххлористым углеродом. Наука и новые технологии. 2000. 2:102-104.
17. Исманов Э.М., Омурбекова Г.К., Байдолотов Р.Р., Ташполотов И.Т. Кинетика низкотемпературного хлорирования оксидов металлов и кремния в рисовой шелухе. Наука и новые технологии. 2013. 3:20-22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры физики, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Рысбаева Имийла Акимжановна – кандидат технических наук, доцент, директор Технологического института, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, imiyla@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4481-2732>

Бекболот кызы Бактыгул – кандидат химических наук, ведущий специалист Отдела экспертизы объектов промышленной собственности Управления экспертизы, Кыргызпатент, Бишкек, Кыргызская Республика, bekbolotkyzy75@mail.ru, <https://orcid.org/009-0005-8998-3334>

Чимчикова Майрам Камчибековна – доцент кафедры технологий изделий легкой промышленности, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, mchimchikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0096-8930>

Рашид кызы Бурулча – преподаватель кафедры прикладной информатики и информационной безопасности, Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика, burulcha9090@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7785-6861>

ВКЛАД АВТОРОВ

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – научное руководство, концепция исследования.

Рысбаева Имийла Акимжановна – концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Бекболот кызы Бактыгул – сбор материала по литературным источникам.

Чимчикова Майрам Камчибековна – проведение экспериментальной части.

Рашид кызы Бурулча – написание текста, обработка материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 06.12.2023.

Content of the issues for 2023

№ 1/2023

PUBLISHER INFORMATION	2
TO THE AUTHORS AND READERS	
The journal "Nanotechnology in Construction" (ISSN 2075-8545) is included in the global information project CNKI (China)	5
APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES AND NANOMATERIALS IN CONSTRUCTION	
<i>Boev E.V., Islamutdinova A.A., Aminova E.K.</i> Development of technology for obtaining anticorrosive nanostructured polyalkenylamide-succinimide coatings in construction	6
<i>Chayka T.V., Gavrish V.M., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I.</i> Influence of high-dispersive powder mixture of WC and TiC on the composite materials properties	14
TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Massalimov I.A., Chuikin A.E., Massalimov B.I., Mustafin A.G.</i> New Protective Coatings Based on Sulfur Nanoparticles Produced from Potassium Polysulfide	27
REVIEW OF NANOTECHNOLOGICAL INVENTIONS	
<i>Ivanov L.A., Xu L.D., Pisarenko Zh.V., Muminova S.R., Miloradova N.G.</i> Inventions in the area of nanotechnologies and nanomaterials. Part I	37
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology	48
TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Nazarov V.G., Dedov A.V., Bokova E.S.</i> Compressibility of the composite material with fiber filler and nanodimensional polyurethane matrix for road and hydro engineering construction	53
APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES AND NANOMATERIALS IN CONSTRUCTION	
<i>Zheldakov D. Yu., Tursukov S.A., Sinitsin D.A., Pudovkin A.N., Parfenova A.A.</i> Evaluation of the nanostructure durability for mineral wool fibers using the theory of chemical corrosion	59
THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES	
<i>Gorbatova V. N., Gordeeva I. V., Dudareva T. V., Krasotkina I. A., Nikol'skii V. G., Egorov V. M.</i> Effect of the active powder of discretely devulcanized rubber on bitumen properties at low temperatures	72
PUBLISHING ETHICS	84
AUTHOR GUIDELINES	88

№ 2/2023

PUBLISHER INFORMATION	94
CONSTRUCTION MATERIAL SCIENCE	
<i>Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O.</i> Methodological substantiation of the choice of a stabilizer for bismuth titanate fine particles suspensions.....	97
THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS	
<i>Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G.</i> Investigation of properties in nanomodified polyethylene-based wood-polymer composites.....	110
TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Nazarov V.G., Ivanov L.A., Dedov A.V., Bokova E.S., Statnik E.S.</i> Gradient non-woven fabrics with a modified surface nanolayer for water filtration in the construction industry	117
DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS	
<i>Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Kotova K.S., Shvedova M.A., Yurov P.Yu.</i> Study of the strength regulation factors for the adhesive bonding “cement matrix – reinforcing fiber” in composites for 3d-printing in the building process	124
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology.....	134
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Yudaev P.A., Tamboura B., Chistyakov E.M.</i> Antistatic polymeric materials.....	139
<i>Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Ryzhikh D.A., Forova E.V.</i> Effect of laser processing on composite films with nanodispersed SiO ₂	152
<i>Mazitova A.K., Sukhareva I.A., Sidorov G.M., Talipov R.A., Aminova A.F.</i> Research of the wastewater treatment method for the production of wood-chip building materials in the presence of a nanostructured heterogeneous catalys.....	164
THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES	
<i>Balykov A.S., Kaledina E.A., Volodin S.V.</i> Compressive strength prediction and composition design of structural lightweight concretes using machine learning methods.....	171
PUBLISHING ETHICS	187
AUTHOR GUIDELINES	191

№ 3/2023

PUBLISHER INFORMATION	197
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Beregovoy V.A., Snadin E.V., Inozemtsev A.S., Pilipenko A.S.</i> High-Performance Concretes for Machine Building with Nano- and Micro-Scale Raw Materials	200
<i>Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Tkach E.V., Stepina I.V.</i> Anti-icing coating based on silicone resin SILRES® MSE100	211
<i>Zhegera K.V., Ryzhov A.D., Sokolova J.A., Shestakov N.I.</i> Patterns of structure formation in lime composites with additive based on amorphous aluminosilicates.....	220
THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS	
<i>Ilyina V.N., Ilyin S.V., Gafarova V.A., Kuzeev I.R.</i> How Nanocarbon Fillers Influence Properties of the Composite Materials	228
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Morozova M.V.</i> Reactivity as one of the criteria for the selection of raw materials for the production of active fine mineral powders	238
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology.....	246
DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS	
<i>Rakhmatullina R.G., Yarmukhametova G.U., Maskova A.R., Rusinov A.A.</i> Study on the influence of the additives for the thermophysical properties of paraffin-containing dispersed systems	251
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A.</i> Regulation of the aggregate stability for binary polymer-mineral dispersions	258
<i>Ketov A.A., Krasnovskikh M.P., Kalinina E.V., Ofrikhter V.G., Tatiannikov D.A.</i> Influence of nanostructural modifier from automobile tires on consumer properties of bitumen.....	267
RESEARCH RESULTS OF SCIENTISTS AND SPECIALISTS	
<i>Denisova O.A.</i> Acoustooptic shutter for glass units.....	274
PUBLISHING ETHICS	285
AUTHOR GUIDELINES	289

№ 4/2023

PUBLISHER INFORMATION	295
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Kuzina V.V., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Koshev A.N.</i> Mathematical modeling of physical and chemical processes in porous media in solving the problems of nanocomposite materials and water-filling.....	298
<i>Slavcheva G.S., Razov I.O., Solonina V.A., Panchenko Y.F.</i> Justification of the criteria requirements for fillers in mixtures for 3D construction printing.....	310
<i>Kurmangalieva A.I., Anikanova L.A., Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Buryanov A.F., Lukyanova N.A., Inozemtsev A.S., Inozemtsev S.S.</i> Formation of porous structures in production technology of construction materials based on building gypsum plaster	319
DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS	
<i>Ilyina V.N., Ilyin S.V., Khalikova G.R., Gafarova V.A., Kuzeev I.R.</i> Research on the impact of nano carbon fillers on the morphology of epoxy binder	328
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology.....	337
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Boev E.V., Kasyanova L.Z., Islamutdinova A.A., Aminova E.K.</i> Production method of nanostructured wood-polymer composition with microwave application	342
RESEARCH RESULTS OF SCIENTISTS AND SPECIALISTS	
<i>Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Shinkaruk A.A., Makhova T.A.</i> Potentiometric method for assessing the pozzolatic activity of highly dispersed materials	349
<i>Dorogaya E.S., Suleymanov R.R., Kuzina E.V., Yurkevich M.G., Bakhmet O.N.</i> On the possibility of utilizing sodium lignosulfonate as a nano-organic foundation for creating soil-like bodies in the purposes of technogenic-degraded land rehabilitation.....	359
<i>Rada A.O., Kuznetsov A.D., Zverev R.E., Timofeev A.E.</i> Automation of monitoring construction works based on laser scanning from unmanned aerial vehicles.....	373
PUBLISHING ETHICS	383
AUTHOR GUIDELINES	387

№ 5/2023

PUBLISHER INFORMATION	393
TO THE AUTHORS AND READERS	
The SCIENCE INDEX performance indicators of the journal "Nanotechnology in Construction" have improved for the year 2022.....	396
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O.</i> Exploring the Surface Chemistry for the Stabilization of Bismuth Titanate Fine Particle Suspensions in Cement Systems.....	397
<i>Steshenko A.B., Kudiyakov A.I., Inozemtcev A.S., Inozemtcev S.S.</i> Controlling the structural formation of porized cement composites in the production of thermally efficient enclosure structures of enhanced quality.....	408
STUDY OF PROPERTIES OF NANOMATERIALS	
<i>Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Kiyamov I.K., Sabitov L.S., Oleinik V.Iv.</i> Investigating the influence of carbon nanotube-based additives on the phase composition of cement mortar during well cementation.....	418
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Gorbunova E.A.</i> Performance evaluation of foamed materials based on cold-cured liquid glass.....	424
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology.....	438
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Buryanov A.F., Lukyanova N.A., Soloviev V.G.</i> Composite building materials based on nanomodified cement systems	443
<i>Glazachev A.O., Ivanova O.V., Sinitsin D.A., Akhmetshin R.M.</i> Complementary improvement of technological characteristics of asphalt concrete road surfaces using macromolecular nanocomposites	453
<i>Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Yastrebinsky R.N., Lebedev M.S., Kashibadze V.V.</i> Peculiarities of the formation of silicon oxide films modified with metal nanoparticles.....	465
RESEARCH RESULTS OF SCIENTISTS AND SPECIALISTS	
<i>Kobelev A.A., Konstantinova N.I., Korolchenko O.N., Tsarichenko S.G., Bokova E.S.</i> Study of ignition parameters and the thermooxidative degradation of wood in the presence of flame retardants with a bioprotective effect...	474
<i>Bashirov M.G., Bashirova E.M., Yusupova I.G., Akchurin D.Sh., Yulberdin R.T.</i> Identification of the stress-strain state and damage of metal structures of building constructions with nanoparticle coatings using the electromagnetic-acoustic method.....	482
<i>Ilina L.V., Samchenko S.V., Rakov M.A., Zorin D.A.</i> Modeling the kinetics of cement composite processes modified with calcium-containing additives	494
PUBLISHING ETHICS	504
AUTHOR GUIDELINES	508

№6 / 2023

HAPPY NEW YEAR 2024!	514
PUBLISHER INFORMATION	515
TO THE AUTHORS AND READERS	
The Index Copernicus Value (ICV) of the journal "Nanotechnologies in Construction" for 2022 has increased	518
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S.</i> Application Of Polyvinyl Chloride for Nanocomposites (Analysis And Optimization of Quality Indicators)	519
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Aminova E.K., Kasyanova L.Z., Islamutdinova A.A., Asfandiyarova L.R.</i> Iron Oxide Pigment as a Coloring Nanofill For Decorative Concrete Products	531
<i>Khovansky V.E.</i> Lyophobic sols «БЕТОПРЕСС»® as additives to chemical admixtures into concrete	538
<i>Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Ovsyannikova I.V., Matveeva A.Yu.</i> Wood-Polymer Nano-Modified Composite Materials for Construction Purposes	543
<i>Bashirov M.G., Vildanov R.G., Khafizov A.M., Khismatullin A.S., Akchurin D.Sh.</i> Intelligent Eco-Monitoring System for Selecting a Residential Development Site with Nanofiber-Based Window Filter Screens	552
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
Wuhan University of Technology	559
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Kabdushev A.A., Agzamov F.A., Manapbayev B.Zh., Moldamuratov Zh.N.</i> Microstructural Analysis of Strain-Resistant Cement Designed for Well Construction	564
THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES	
<i>Abdykalykov A., Aidaraliev Zh.K., Abdykalyk kyzy Zh., Kuduev A.Zh., Rashid kyzy B.</i> Suitability Of Basalt Raw Materials Of The Kyrgyz Republic For The Production Of Superthin And Continuous Fibers	574
<i>Rada A.O., Kuznetsov A.D., Akulov A.O., Kon'kov N.Yu.</i> Managing The Accuracy and Speed of Processes For Automated Monitoring Of Construction Works In The Context Of New Technologies	583
<i>Aidaraliev Z.K., Rysbaeva I.A., Bekbolot kyzy B., Chimchikova M.K., Rashid kyzy B.</i> Production of Polycrystalline Silicon by Chlorination From Rice Husk And Purification Of Chlorine-Containing Gases By Adsorption Method	592
CONTENT OF THE ISSUES PUBLISHED IN 2023	602
PUBLISHING ETHICS	608
AUTHOR GUIDELINES	612
CALENDAR 2024	617

Содержание журналов, вышедших в свет в 2023 г.

№ 1/2023

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	2
К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ	
Журнал «Нанотехнологии в строительстве» (ISSN 2075-8545) включен в глобальный информационный проект CNKI (Китай)	5
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Боев Е.В., Исламутдинова А.А., Аминова Э.К.</i> Разработка технологии получения антикоррозионных наноструктурированных полиалкениламидосукцинимидных покрытий в строительстве	6
<i>Чайка Т.В., Гавриш В.М., Павленко В.И., Черкашина Н.И.</i> Влияние высокодисперсного порошка смеси WC и TiC на свойства композиционных материалов.....	14
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Массалимов И.А., Чуйкин А.Е., Массалимов Б.И., Мустафин А.Г.</i> Новые защитные покрытия на основе наночастиц серы, полученных из полисульфида калия	27
ОБЗОР ИЗОБРЕТЕНИЙ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	
<i>Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Писаренко Ж.В., Муминова С.Р., Милорадова Н.Г.</i> Изобретения в области нанотехнологий и наноматериалов. Часть I	37
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	48
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Назаров В.Г., Дедов А.В., Бокова Е.С.</i> Сжимаемость композиционного материала с волокнистым наполнителем и наноразмерной полиуретановой матрицей для дорожного и гидротехнического строительства	53
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Желдаков Д.Ю., Турсуков С.А., Синицин Д.А., Пудовкин А.Н., Парфенова А.А.</i> Оценка долговечности наноструктуры волокон минеральной ваты с применением теории химической коррозии	59
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Горбатова В.Н., Гордеева И.В., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Никольский В.Г., Егоров В.М.</i> Влияние активного порошка дискретно девулканизованной резины на низкотемпературные свойства битума.....	72
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	84
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	88

№ 2/2023

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	94
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Самченко С.В., Козлова И.В., Земскова О.В., Дударева М.О.</i> Методологическое обоснование выбора стабилизатора суспензий тонкодисперсных частиц титаната висмута.....	97
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ	
<i>Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г.</i> Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена.....	110
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Назаров В.Г., Иванов Л.А., Дедов А.В., Бокова Е.С., Статник Е.С.</i> Градиентные нетканые материалы с модифицированным поверхностным нанослоем для фильтрационной подготовки воды в строительстве	117
РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<i>Славчева Г.С., Артамонова О.В., Котова К.С., Шведова М.А., Юров П.Ю.</i> Исследования факторов регулирования прочности адгезионного соединения «цементная матрица – армирующее волокно» в композитах для строительной 3D-печати.....	124
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	134
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Юдаев П.А., Тамбура Б., Чистяков Е.М.</i> Антистатические полимерные материалы.....	139
<i>Черкашина Н.И., Павленко В.И., Городов А.И., Рыжих Д.А., Форова Е.В.</i> Влияние лазерной обработки на композитные пленки с нанодисперсным SiO ₂	152
<i>Мазитова А.К., Сухарева И.А., Сидоров Г.М., Талипов Р.А., Аминова А.Ф.</i> Исследование метода очистки сточных вод производства древесно-стружечных строительных материалов в присутствии наноструктурного гетерогенного катализатора.....	164
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Балыков А.С., Каледина Е.А., Володин С.В.</i> Прогнозирование прочности при сжатии и проектирование составов конструкционных легких бетонов с применением методов машинного обучения	171
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	187
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	191

№ 3/2023

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 197

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Береговой В.А., Снадин Е.В., Иноземцев А.С., Пилипенко А.С.

Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано- и микромасштабных сырьевых компонентов 200

Логанина В.И., Кислицына С.Н., Ткач Е.В., Степина И.В.

Антиобледенительное покрытие на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 211

Жегера К.В., Рыжов А.Д., Соколова Ю.А., Шестаков Н.И.

Закономерности структурообразования известковых композитов с добавкой на основе аморфных алюмосиликатов 220

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р.

Влияние нанокремниевых наполнителей на свойства композиционных материалов 228

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Морозова М.В.

Реакционная способность как один из критериев выбора сырья для получения активных тонкодисперсных минеральных порошков 238

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уханьский технологический университет 246

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рахматуллина Р.Г., Ярмухаметова Г.У., Маскова А.Р., Русинов А.А.

Исследование влияния добавок на теплофизические свойства парафинсодержащих дисперсных систем 251

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Черкашина Н.И., Кожанова Е.П., Старченко С.А.

Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий 258

Кетов А.А., Красновских М.П., Калинина Е.В., Офрихтер В.Г., Татьянников Д.А.

Влияние наноструктурного модификатора из автомобильных покрышек на потребительские свойства битума 267

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Денисова О.А. Акустооптический затвор для стеклопакетов 274

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 285

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 289

№ 4/2023

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 295

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кузина В.В., Самченко С.В., Козлова И.В., Кошев А.Н.

Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах при решении задач создания нанокomпозиционных материалов и влагонаполнения..... 298

Славчева Г.С., Разов И.О., Солонина В.А., Панченко Ю.Ф.

Обоснование критериальных требований к наполнителям в составах смесей для строительной 3D-печати 310

Курмангалиева А.И., Аниканова Л.А., Кудяков А.И., Стешенко А.Б.,

Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Иноземцев А.С., Иноземцев С.С.

Формирование пористых структур в технологии производства строительных материалов на основе строительного гипса 319

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ильина В.Н., Ильин С.В., Халикова Г.Р., Гафарова В.А., Кузеев И.Р.

Исследование влияния нанокomпозитных наполнителей на морфологию эпоксидного связующего 328

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уханьский технологический университет 337

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Боев Е.В., Касьянова Л.З., Исламутдинова А.А., Аминова Э.К.

Способ производства наноструктурированной древесно-полимерной композиции с СВЧ – применением 342

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Шинкарук А.А., Махова Т.А.

Потенциометрический метод оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов 349

Дорогая Е.С., Сулейманов Р.Р., Кузина Е.В., Юркевич М.Г., Бахмет О.Н.

О возможности использования лигносульфоната натрия в качестве наноорганической основы для создания почвоподобных тел в целях рекультивации техногенно-деградированных земель 359

Рада А.О., Кузнецов А.Д., Зверев Р.Е., Тимофеев А.Е.

Автоматизация мониторинга строительных работ на основе лазерного сканирования с беспилотных воздушных судов 373

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 383

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ..... 387

№ 5/2023

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	393
К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ	
Значение показателей SCIENCE INDEX журнала «Нанотехнологии в строительстве» за 2022 год повысилось	396
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Самченко С.В., Козлова И.В., Земскова О.В., Дударева М.О.</i> Коллоидно-химические аспекты стабилизации суспензий тонкодисперсных частиц титаната висмута для цементных систем.....	397
<i>Стешенко А.Б., Кудяков А.И., Иноземцев А.С., Иноземцев С.С.</i> Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих конструкций повышенного качества.....	408
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ	
<i>Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Киямов И.К., Сабитов Л.С., Олейник В.Ив.</i> Исследование влияния на фазовый состав цементных растворов добавок на основе углеродных нанотрубок при цементировании скважин.....	418
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Горбунова Э.А.</i> Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения	424
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	438
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Соловьев В.Г.</i> Композиционные строительные материалы на основе наномодифицированных цементных систем.....	443
<i>Глазачев А.О., Иванова О.В., Синицин Д.А., Ахметшин Р.М.</i> Комплементарное улучшение макромолекулярными наноконструкциями технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог	453
<i>Павленко В.И., Городов А.И., Ястребинский Р.Н., Лебедев М.С., Кашибадзе В.В.</i> Особенности формирования пленок оксида кремния, модифицированных наночастицами металла.....	465
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Кобелев А.А., Константинова Н.И., Корольченко О.Н., Цариченко С.Г., Бокова Е.С.</i> Исследование параметров воспламеняемости и процесса термоокислительного разложения древесины в присутствии эффективных средств огнебиозащиты.....	474
<i>Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш., Юлбердин Р.Т.</i> Идентификация напряженно- деформированного состояния и поврежденности структуры металла строительных конструкций с нанопокрывами электромагнитно-акустическим методом.....	482
<i>Ильина Л.В., Самченко С.В., Раков М.А., Зорин Д.А.</i> Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальцийсодержащими добавками	494
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	504
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	508

№ 6/2023

С НОВЫМ, 2024 ГОДОМ!	514
ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	515
К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ	
Значение показателя Index Copernicus Value журнала «Нанотехнологии в строительстве» за 2022 год повысилось	518
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С.</i>	
Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества)	519
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Аминова Э.К., Касьянова Л.З., Исламутдинова А.А., Асфандиярова Л.Р.</i>	
Железооксидный пигмент как красящий нанонаполнитель декоративно-бетонных изделий.....	531
<i>Хованский В.Е.</i>	
Леофобные золи «БЕТОПРЕСС»® в качестве присадок к химическим добавкам в бетон.....	538
<i>Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В., Овсянникова И.В., Матвеева А.Ю.</i>	
Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы.....	543
<i>Баширов М.Г., Вильданов Р.Г., Хафизов А.М., Хисматуллин А.С., Акчурун Д.Ш.</i>	
Интеллектуальная система экомониторинга для выбора участка застройки жилых домов с применением оконных сеток-фильтров на основе нановолокна	552
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	559
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н.,</i>	
Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин	564
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Жыпаргул, Кудуев А.Ж., Рашид кызы Бурулча.</i>	
Пригодность базальтового сырья Кыргызской Республики для производства супертонких и непрерывных волокон	574
<i>Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Коньков Н.Ю.</i>	
Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий.....	583
<i>Айдаралиев Ж.К., Рысбаева И.А., Бекболот кызы Б., Чимчикова М.К., Рашид кызы Б.</i>	
Получение поликристаллического кремния хлорированием из рисовой шелухи и очистки хлорсодержащих газов адсорбционным методом.....	592
СОДЕРЖАНИЕ НОМЕРОВ ЖУРНАЛА, ВЫШЕДШИХ В 2023 ГОДУ	602
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	608
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	612
КАЛЕНДАРЬ НА 2024 ГОД	617

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 activities, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

Ethical oversight of the published materials

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

Derivation and plagiarism

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

Intellectual property

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

- support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
- cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

Preprint and postprint policy

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.

On the procedure in case of abusive practice (infringement)

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.

ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике ([Committee on Publication Ethics](#)), 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 искусственно-го увеличения объема публикаций (*salami-slicing*).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самостоятельно и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе [Антиплагиат](#) по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторы.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.

Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.

2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.

3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.

Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».

4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.

5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.

6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.

7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.

2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.

3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.

4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.

5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлекцией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлекции, рецензентами.

2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.

3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлекции не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.

4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлекции без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.

5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.

6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.

7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.

Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и апелляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редколлегии, организовав немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

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 соответствует тематике журнала; структура статьи и оформление соответствуют требованиям редакции; все цитирования оформлены корректно, указаны источники для таблиц и рисунков (если не указано иное, предполагается, что таблицы и рисунки созданы автором).

Основные разделы журнала:

- строительное материаловедение;
- исследование свойств наноматериалов;
- результаты исследований ученых и специалистов;
- технологии производства строительных материалов и изделий;
- международное научно-техническое сотрудничество;
- обзор изобретений в области nanoиндустрии
- разработка новых материалов;
- рациональное использование природных ресурсов;
- эффективное использование вторичного сырья;
- применение нанотехнологий и наноматериалов в строительстве;
- системные решения технологических проблем;
- в смежных отраслях;
- форумы, выставки, конференции, мероприятия строительной отрасли и nanoиндустрии.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с нанопокрывом; формирование наноструктурных покрытий лазерным напылением; системы преподавания основ нанотехнологий; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: научные статьи, обзорные статьи, редакционные статьи, дискуссионные статьи, редакторские заметки, рецензии на книгу, рецензии на статью и т. п.

Структура статьи (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021)

НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (In English)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, paper reviews, etc.) (In English)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Заглавие статьи (In English)

Имя Отчество (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (In English)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.)

* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract: независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (**Introduction, Methods and Materials, Results, Discussion, Conclusion**), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на английском языке):

Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion...Conclusion...

Keywords: (In English)

Acknowledgments: (при наличии) (In English)

For citation: (In English)

Пример.

For citation: Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes. *Nanotechnologies in Construction*. 2021;13(4):213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

Статья ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):

- INTRODUCTION
- METHODS AND MATERIALS
- RESULTS
- DISCUSSION
- CONCLUSION

References (In English) (согласно Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In English)

- имя, отчество, фамилия автора (полностью);
- ученое звание;
- ученая степень;
- наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.);
- адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);

- электронный адрес автора (e-mail);
- открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример.

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

Contribution of the authors (In English):

имя, первая буква отчества и фамилия автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

Пример.

Marina S. Morozova – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Elena V. Bokova – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (на русском языке)

Научная статья (обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью и т. п.) (на русском языке)

УДК XXX

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Заглавие статьи (на русском языке)

Имя Отчество (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (на русском языке)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (на русском языке)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.)

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация (или **Резюме**): независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (введение, методы и материалы, результаты, обсуждение, заключение (выводы)), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на русском языке):

Аннотация (или **Резюме**): **Введение... Методы и материалы... Результаты... Обсуждение... Заключение (выводы)...**

Ключевые слова: (на русском языке)

Благодарности: (при наличии) (на русском языке)

Для цитирования: (на русском языке)

Пример.

Для цитирования: Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© авторы, 2021

Статья (на русском языке, объем – 3–6 тыс. слов):

- **Введение**
- **Методы и материалы**
- **Результаты**
- **Обсуждение**
- **Заключение (выводы)**

Список источников (на языке оригинала статьи – русском или английском)

Информация об авторе (-ах) (на русском языке)

- фамилия имя отчество автора (полностью);
- ученое звание;
- ученая степень;
- наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
- адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
- электронный адрес автора (e-mail); – открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример.

Писаренко Жанна Викторовна – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

Вклад авторов (на русском языке):

- фамилия инициалы автора;
- в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

Пример.

Морозова М.С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Бокова Е.В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию XX.XX.202X; одобрена после рецензирования XX.XX.202X; принята к публикации XX.XX.202X.

Оформление текста рукописи

Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе Microsoft Word в формате .rtf.

Оформление

- используйте шрифт 14 Times New Roman и интервал 1,5 строки;
- не используйте подчеркивание внутри текста (для подзаголовков используйте полужирное начертание, для выделения в тексте – курсив);
- иностранные названия (журналов, организаций и т.д.) следует оставлять в оригинале, заключать в кавычки.

Аббревиатуры

Все аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если аббревиатур много, можно сделать список с расшифровкой каждой из них перед текстом статьи.

Таблицы и рисунки

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и названы, на них должна быть отсылка в тексте статьи. В таблицах не должно быть пустых граф. Рисунки должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Прикладываются к статье отдельными файлами.

Чтобы проверить качество изображения, можно увеличить его. Хорошее изображение не размывается при увеличении.

Сноски

При необходимости используются сноски со сквозной нумерацией (арабские цифры) по всему документу. В сносках могут быть цитаты из работ, которые упоминаются в тексте, дополнительная информация.

Оформление цитат и списка литературы

В журнале принят Ванкуверский стиль цитирования (отсылка в тексте в квадратных скобках, полное библиографическое описание источника в списке литературы в порядке упоминания в тексте статьи).

Список источников

В список литературы включаются источники, используемые в тексте статьи. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

Оформление ссылок на источники, библиографических ссылок осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021.

Авторские права

Авторы, публикующиеся в журнале, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.
3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или на персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большому количеству ссылок на данную работу.

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.

The editors are pleased to invite you to publish your materials in the Internet-Journal

www.nanobuild.ru

e-mail: info@nanobuild.ru

JANUARY

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

FEBRUARY

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29			

MARCH

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

APRIL

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

MAY

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

JUNE

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

JULY

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

AUGUST

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

SEPTEMBER

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

OCTOBER

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

NOVEMBER

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

DECEMBER

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

2024

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ:
научный интернет-журнал

Nanobuild.ru
из НАНО строится ГИГАуспех!
GIGAsuccess is built from NANO!



Редакция приглашает к публикации материалов в Интернет-журнале

www.nanobuild.ru

e-mail: info@nanobuild.ru

ЯНВАРЬ • JANUARY						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

ФЕВРАЛЬ • FEBRUARY						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29			

МАРТ • MARCH						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

АПРЕЛЬ • APRIL						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

МАЙ • MAY						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

ИЮНЬ • JUNE						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

ИЮЛЬ • JULY						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

АВГУСТ • AUGUST						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

СЕНТЯБРЬ • SEPTEMBER						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

ОКТАБРЬ • OCTOBER						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

НОЯБРЬ • NOVEMBER						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

ДЕКАБРЬ • DECEMBER						
пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

из НАНО строится ГИГАуспех