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

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION A Scientific Internet-Journal 2025 • Tom 17 • No. 1
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ научный Интернет-журнал 2025 • Том 17 • № 1

IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement
- Development of a concrete mixture composition utilizing a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms
- A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions
- An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar

- Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов
- Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм
- Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува
- Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором

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)

ISSN 2075-8545 (online)

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
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 publishes: original papers; reviews; discussing materials, comments, other information materials.

The language of publication: English; Russian.

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

EDITORS

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher – Center for New Technologies «Nanostroitel'stvo», Korolev, Moscow region, Russian Federation
Contacts: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

Address of edition: Russian Federation, 125009, Moscow, Gazetny per., bld. 9, str. 4
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru

Website: http://nanobuild.ru/

Release date of № 1 Vol. 17 is 20.02.2025

ISSUED WITH SUPPORT OF

RUSSIAN ACADEMY OF ENGINEERING

INTERNATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING

WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (CHINA)

BEIJING INSTITUTE OF INTELLECTUAL PROPERTY (CHINA)

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: A Scientific Internet-Journal 2025 • Vol. 17 • No. 1
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION 2

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Chernykh T.N., Kiiko P.I., Kriushin M.V.
Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement 5

Zhegera K.V., Dasaeva N.A.
Development of a concrete mixture composition utilizing a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms 14

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Vlasov I.N., Bokova E.S.
A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions 23

Frolova M.A., Lesovik V.S., Morozova M.V., Orekhova T.N.
Potentiometric method for determination of hydraulic activity of quartz-containing powders 32

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION

Wuhan University of Technology 42

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES

Gusev B.V., Saurin V.V.
Formulation of the actual state principle for a physical system 48

Chimchikova M.K., Rysbaeva I.A., Aidaraliev Z.K., Talgatbekova A.Zh., Mamytov A.B.
Creation of polymer composites with mineral fillers 59

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION

Devyatkin E.M., Khismatullin A.S., Poberezhsky S.Yu.
An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar 74

SYSTEM SOLUTIONS FOR TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Tang V.L., Nguyen T.D., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V.
Low carbon footprint building materials using industrial waste 83

PUBLISHING ETHICS 95

AUTHOR GUIDELINES 99

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

ISSN 2075-8545 (online)

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

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

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

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

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

Язык издания: русский; английский.

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

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 № 1, Том 17, 2025: 20.02.2025 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

РОССИЙСКОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

МЕЖДУНАРОДНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)

ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: научный Интернет-журнал 2025 • Том 17 • № 1

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 2

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Черных Т.Н., Кийко П.И., Криушин М.В.
Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов 5

Жегера К.В., Дасаева Н.А.
Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм 14

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Власов И.Н., Бокова Е.С.
Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува 23

Фролова М.А., Лесовик В.С., Морозова М.В., Орехова Т.Н.
Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков 32

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уханьский технологический университет 42

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Гусев Б.В., Саурин В.В.
Формулировка принципа действительного состояния физической системы 48

Чимчикова М.К., Рысбаева И.А., Айдаралиев Ж.К., Талгатбекова А.Ж., Мамытов А.Б.
Создание полимерных композитов с минеральными наполнителями 59

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Девяткин Е.М., Хисматуллин А.С., Побережский С.Ю.
Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором 74

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Танг В.Л., Нгуен Ч.З., Булгаков Б.И., Александрова О.В.
Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов 83

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 95

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 99

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13

CC BY 4.0

Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement

Tamara N. Chernykh*, **Polina I. Kiiko**, **Mikhail V. Kriushin**
South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia
* Corresponding author: e-mail: chernykhtn@susu.ru

ABSTRACT

Introduction. The cost of anatase additives to concrete can be lowered by synthesizing it and applying it to a mineral substrate that is active against cement. In particular, the use of anatase in mineral powders such as silica shows promise. This paper describes the synthesis of anatase-silica photocatalysts with varying anatase to silica ratios and evaluates their performance in cement-based materials. **Materials and methods.** The photocatalytic additive was obtained by TiO_2 deposition on the microsilica substrate using sol-gel technology. The physicochemical studies included X-ray phase analysis and electron scanning microscopy. To determine the self-cleaning, we used the rhodamine test. **Results and discussion.** An increase in the TiO_2/SiO_2 ratio increases the area covered with anatase and the height of the main anatase reflections in the X-ray phase analysis. But the increase in the anatase reflection intensity is not proportional to the change in the TiO_2/SiO_2 ratio with the same size of anatase crystallites. With an increase in TiO_2 relative to SiO_2, the self-cleaning efficiency increases and reaches the required level when the ratio of oxides in the additive is slightly less than 1:1. It means that 1 g of TiO_2 is enough per specific surface area of the substrate 22 m^2 to create an effective photocatalytic additive. **Conclusion.** The optimal TiO_2/SiO_2 ratio of 1:1 was revealed by varying the amount of anatase relative to the substrate in the range of TiO_2/SiO_2 ratios from 1:2 to 1:0.5. The results can be used in the production of technically and economically effective photocatalytic additives for self-cleaning materials based on cement.

KEYWORDS: Self-cleaning, anatase additives, anatase-silica photocatalysts

FOR CITATION:
Chernykh T.N., Kiiko P.I., Kriushin M.V. Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(1):5–13. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13. – EDN: UCUMYT.

INTRODUCTION

Self-cleaning building materials are innovative solutions that can themselves of dirt or bacteria without need for human intervention. These materials are particularly effective in facade finishing within the construction industry, especially for buildings and structures located near industrial facilities and highways. The use of self-cleaning materials in facades can significantly extend their service life compared to those using conventional materials.

Many different surface self-cleaning strategies have been developed over the past few decades [1]. The most promising strategy for building materials based on mineral binders is the use of photocatalytically active additives, which decompose organic matter and impart superhydrophilic properties to the surface [2]. Water droplets, forming a thin film on superhydrophilic surfaces, wedge between the base and the pollutants washing them off [3]. The most widespread photocatalyst additives are nano- and micro-sized titanium dioxide (TiO_2) in the anatase modification. The anatase form of TiO_2 makes additives photocatalytically active at a sufficiently high band gap of 3.2 eV, which corresponds to near ultraviolet light with a wavelength of 390 nm [4–6]. Such radiation is part of the solar spectrum, but the efficiency of the photocatalyst under the influence of visible radiation is less than 10 % [7, 8]. Anatase photocatalyst additives are also very expensive, which impedes their widespread use in construction.

The cost of anatase additives can be reduced by their synthesis through the deposition on a mineral substrate, which can be active with respect to the binder [9–13] or have its own photocatalytic activity to expand the radiation spectrum triggering photocatalysis [14–18].

© Chernykh T.N., Kiiko P.I., Kriushin M.V., 2025

The deposition of anatase on mineral powders conventionally used for the production of cement materials as active mineral additives with a highly developed surface and stability up to 550 °C is promising, since the additive is heated to this temperature during synthesis.

An effective and widespread pozzolanic additive in concrete is microsilica. It is a waste product, which determines its low cost. Microsilica has a highly developed surface and ability to bind portlandite, which determines its efficiency and popularity [19–21].

Therefore, obtaining a complex additive from anatase deposited on microsilica for facade cement materials is expedient and economically sound. This work describes the synthesis of anatase-silica photocatalysts with different anatase and silica ratios and assesses their efficiency for cement-based materials.

METHODS AND MATERIALS

To synthesize the photocatalyst, tetrabutoxytitanium (PromKhimPerm LLC, TU 6-09-2738-09) was used as a source of TiO_2 and MK-85 microsilica (ChEMK JSC, GOST R 58894-2020) with a mass fraction of SiO_2 of 85 % and a specific surface area of 12.5 m^2/g was used as a substrate for TiO_2 deposition. OP-10, a non-ionic surfactant (Soyuzkhimprom CJSC), was used for the uniform distribution of TiO_2 over the substrate surface.

The photocatalytic additive was obtained by TiO_2 deposition on the substrate using sol-gel technology [9]. The synthesis included the following four stages: the dissolution of the surface-active additive (OP-10) in ethyl alcohol in a magnetic stirrer for 5 minutes; the sequential introduction of microsilica powder and tetrabutoxytitanium into the mixture in the magnetic stirrer for 30 minutes; drying (gel aging) for 24 hours in a laboratory chamber dryer at 115 ºC; and roasting in a laboratory chamber furnace for two hours at 550 ºC.

White Portland cement PCB 1-500D0 GOST 965-89 (Cemiks LLC) was used as a binder.

The physicochemical studies included X-ray phase analysis using an Ultima IV X-ray diffractometer and electron scanning microscopy using a Jeol JSM-7001F scanning electron microscopy complex, EDS Oxford INCA X-max 80, WDS Oxford INCA WAVE, EBSD, and HKL. While preparing for the analysis, additive samples were not crushed to preserve their structure, which allows the indirect assessment of the coating of microsilica particles with anatase.

To determine the self-cleaning of hardened cement paste, we used the rhodamine test described in the Italian standard UNI11259-2016 [22], which quantifies the self-cleaning efficiency and assesses whether the material is self-cleaning. We used an irradiation lamp with a wavelength of 390nm and an organic dye – rhodamine B. During the tests, some of the samples were dyed with a solution of rhodamine B at a concentration of $4 \cdot 10^{-4}$ mol/l in an amount of 3.84 ml/cm^2. The samples were photographed and placed under a UV lamp. After 4 and 26 hours, the samples were photographed to record the color change. Photographing parameters included complete darkness and a flash as a light source. Camera settings included the focal distance of f/1.8, ISO400 light sensitivity, white balance 4000, and a shutter speed of 1/250 sec. The surface color (dye degradation efficiency) was measured using ImageJ software according to RGB coordinates. They are converted into the CIELAB system using L^* a^* b^* color coordinates, where L is luminosity, a and b are colorimetric coordinates representing the color tone measurement in a two-dimensional plane. The color change between the source color of the material and the color with the applied dye is calculated by:

$$E_{source} = \sqrt{(L_{source} - L_d)^2 + (a_{source} - a_d)^2 + (b_{source} - b_d)^2}, \quad (1)$$

where L_{souce}, a_{source}, b_{source} are the CIELAB coordinates of the source color of the material in the photograph; and L_d, a_d, b_d are the CIELAB coordinates of the dyed surface color in the photograph immediately after applying the dye.

The color change between the source color of the material and the color with the applied dye after irradiation for t hours is calculated by:

$$E_t = \sqrt{(L^*_{source} - L_t)^2 + (a^*_{source} - a_t)^2 + (b^*_{source} - b_t)^2}, \quad (2)$$

where L^*_{souce}, a^*_{source}, b^*_{source} are the CIELAB coordinates of the source color of the material in the photograph after t hours of irradiation; and L_t, a_t, b_t are the CIELAB coordinates of the dyed surface color in the photograph after t hours of irradiation.

The calculation of the color degradation efficiency (%) is:

$$R_E = \frac{|E_t - E_{source}|}{E_{source}}.$$

If the indicator reaches 20% after 4 hours and 50% after 26 hours, the material is considered self-cleaning.

RESULTS AND DISCUSSION

The ratio of components used to synthesize the anatase-silica additive was selected based on the TiO_2 and SiO_2 ratio upon completion of synthesis. Table 1 presents the number of components per laboratory synthesis.

The surface coating of microsilica with anatase was assessed using electron microscopy (Fig. 1).

The microphotograph of the additive with the minimum TiO_2 content (Fig. 1a, composition #1 as per Table 1) shows TiO_2 on the surface of the microsilica

particles in separate areas covering no more than 10 % of the surface. The elemental analysis also shows a relatively small amount of titanium relative to silica, which confirms that TiO_2 is insufficient to cover the surface of the microsilica particles. An increase in the TiO_2/SiO_2 ratio increases the area covered with anatase (Fig. 1b, 1c, and 1d). The elemental analysis spectra also show that the amount of TiO_2 relative to SiO_2 increases, which confirms an increase in the area of anatase distribution over the surface of the microsilica particles. Notably, even if the amount of anatase relative to microsilica is at the maximum of the range, silica reflections do not disappear completely, i.e. the particles are not completely covered with anatase.

X-ray phase analysis confirms the formation of TiO_2 in the required anatase modification, while with an increase

Table 1. The ratio of initial components to synthesize the additives

TiO_2/SiO_2 ratio in the additive	Ethyl alcohol, g	Surfactant OP-10, g	Tetrabutoxytitanium, g	Microsilica, g
1:2	36.0	4.0	7.17	4.0
1:1	72.0	4.0	14.33	4.0
1:0.67	108.0	4.0	21.50	4.0
1:0.5	144.0	4.0	28.67	4.0
1:0	36.0	4.0	7.17	0.0

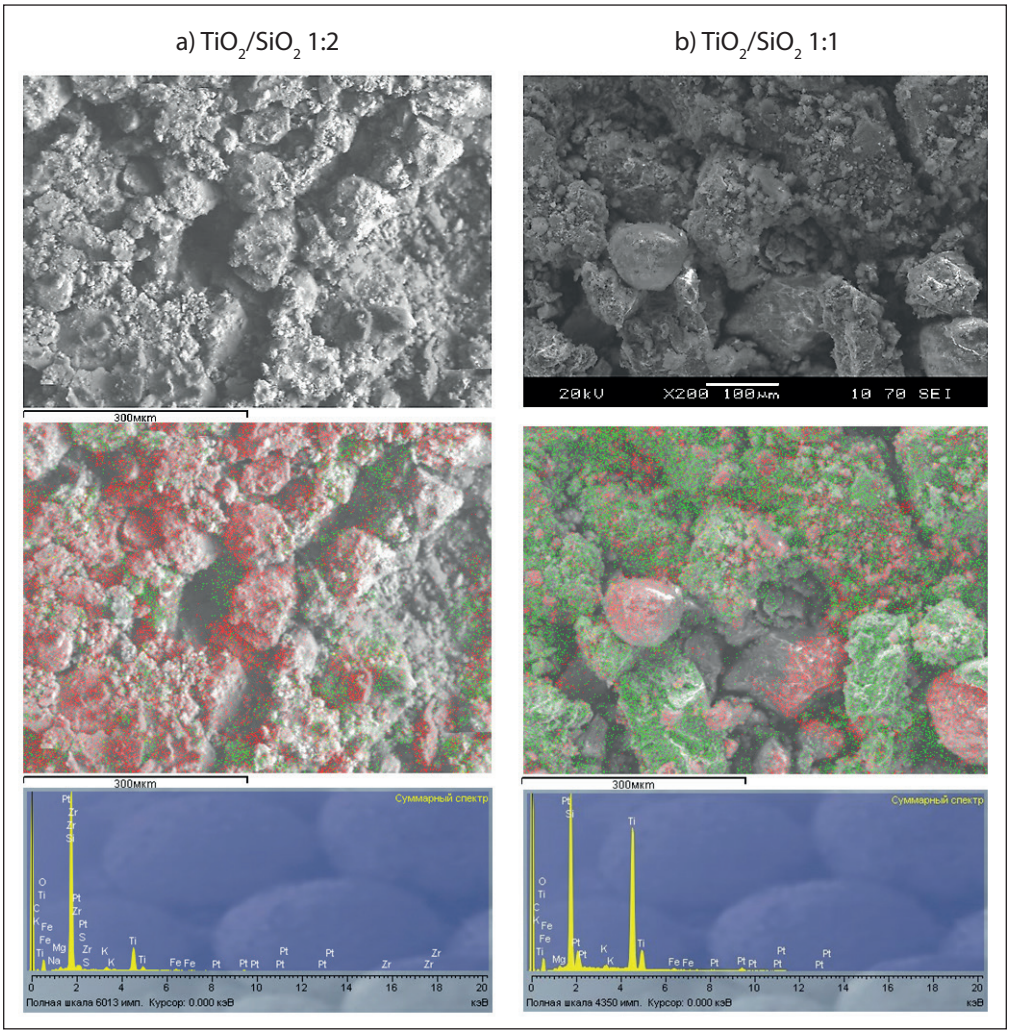


Fig. 1. Microphotographs of additives with different TiO_2/SiO_2 ratios

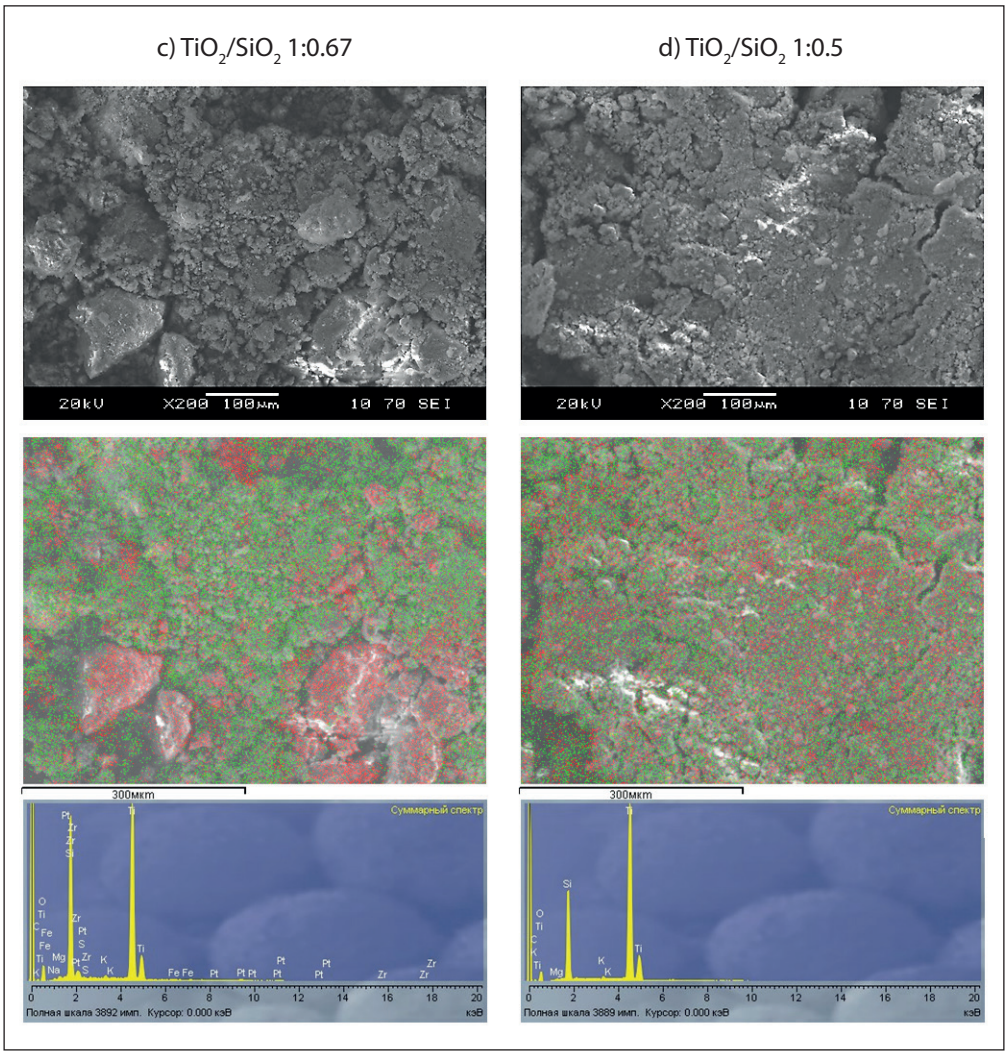


Fig. 1. The End

in the TiO_2/SiO_2 ratio in the diffraction patterns, the height of the main anatase reflections naturally increases (Fig. 2).

We also found that the increase in the anatase reflection intensity in the X-ray phase analysis of the additives with an undisturbed deposited layer is not proportional to the change in the TiO_2/SiO_2 ratio. The resulting dependence has a form close to logarithmic (Fig. 3).

The analysis of the width of the diffraction anatase reflections at their half-height shows that the variations in the peak width are insignificant, which indicates that the size of the anatase crystallites is close and reaches 125–145 nm for hkl 101 and 118–155 nm for hkl 200. Taking into account the specific surface area of microsilica, anatase particles of this size cannot cover the microsilica surface completely. However, for creating a photocatalytic additive, the uniform distribution of anatase over the surface in no more than one layer is more important than covering the substrate completely to ensure the maximum interaction area with a minimum amount of TiO_2.

To identify the optimal TiO_2/SiO_2 ratio in the additive for self-cleaning, we carried out a rhodamine test on tablet samples of hardened cement paste (made of normal-thickness paste) with additives in an amount of 1%. Photographs of the samples before and after 26-hour irradiation are shown in Figure 4; the results of image processing are shown in Table 2 and in Figure 5.

According to the dependence, with an increase in TiO_2 in relation to SiO_2 in the composition of the samples, the self-cleaning efficiency increases and reaches the required level at the oxide ratio in the additive of slightly less than 1:1, which corresponds to 1 g of TiO_2 consumption per specific surface area of microsilica of about 22 m^2. A higher distribution of the photocatalytic additive over the surface of the microsilica substrate increases the efficiency of the additive but also increases the cost.

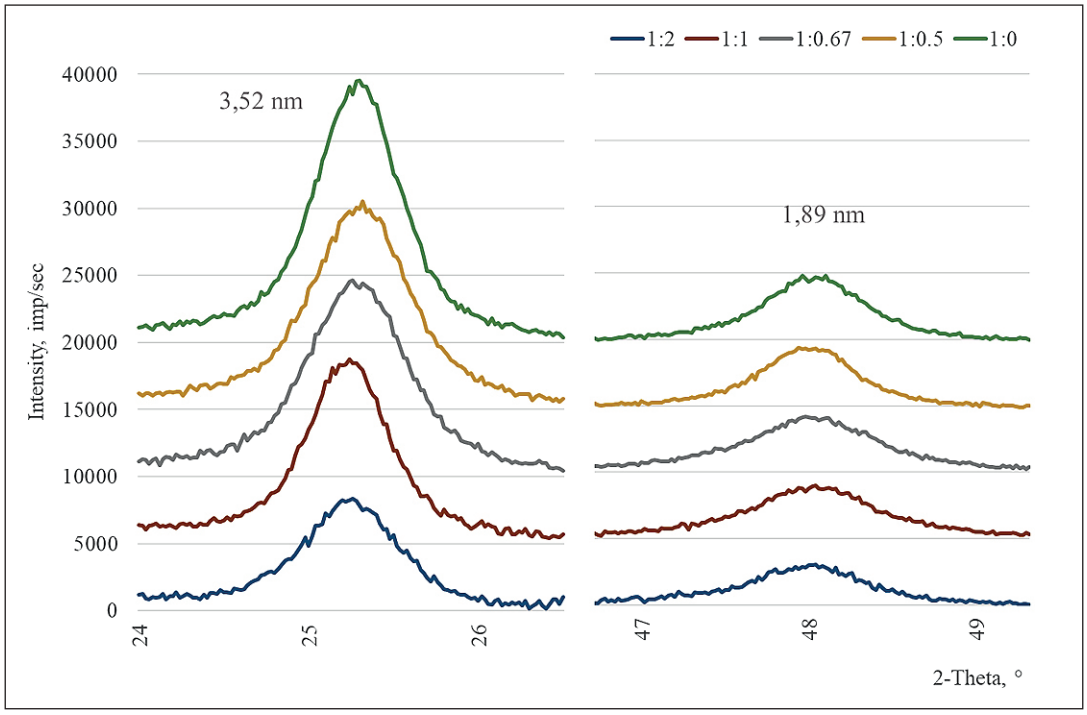


Fig. 2. Main diffraction anatase reflections in diffraction patterns

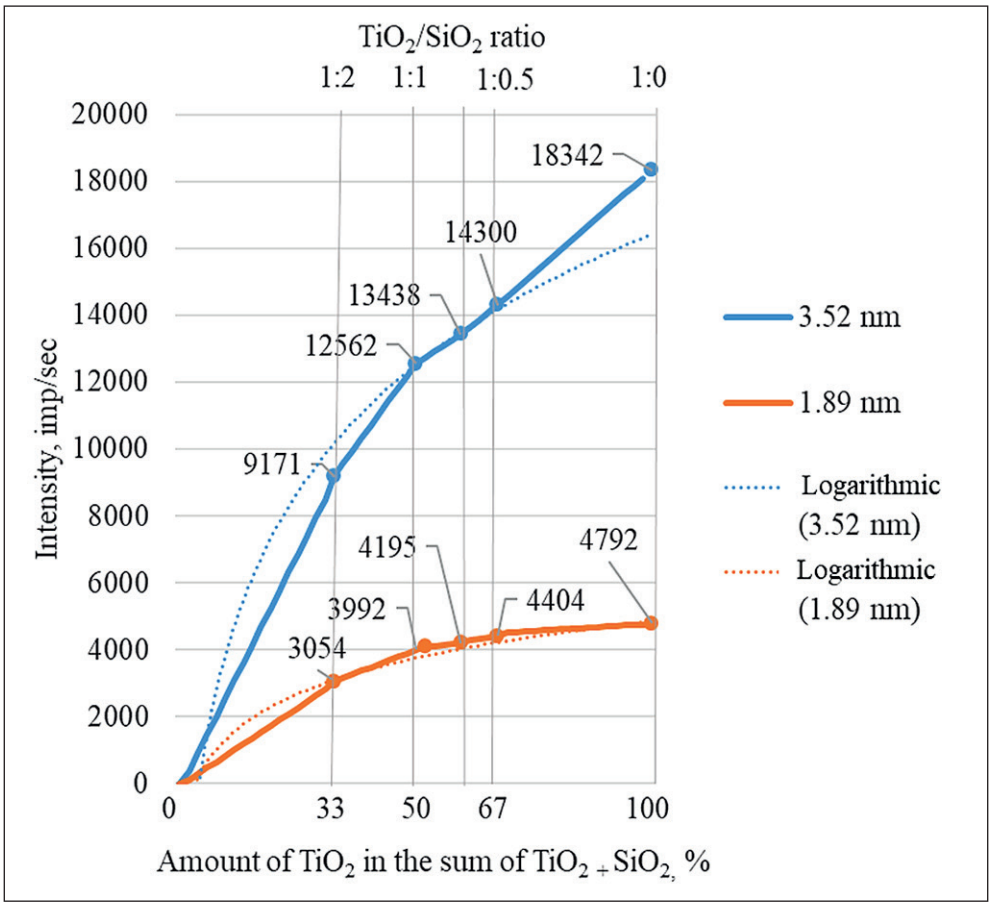


Fig. 3. The dependence of the peak height on the TiO_2/SiO_2 ratio in the initial mixture for the synthesis

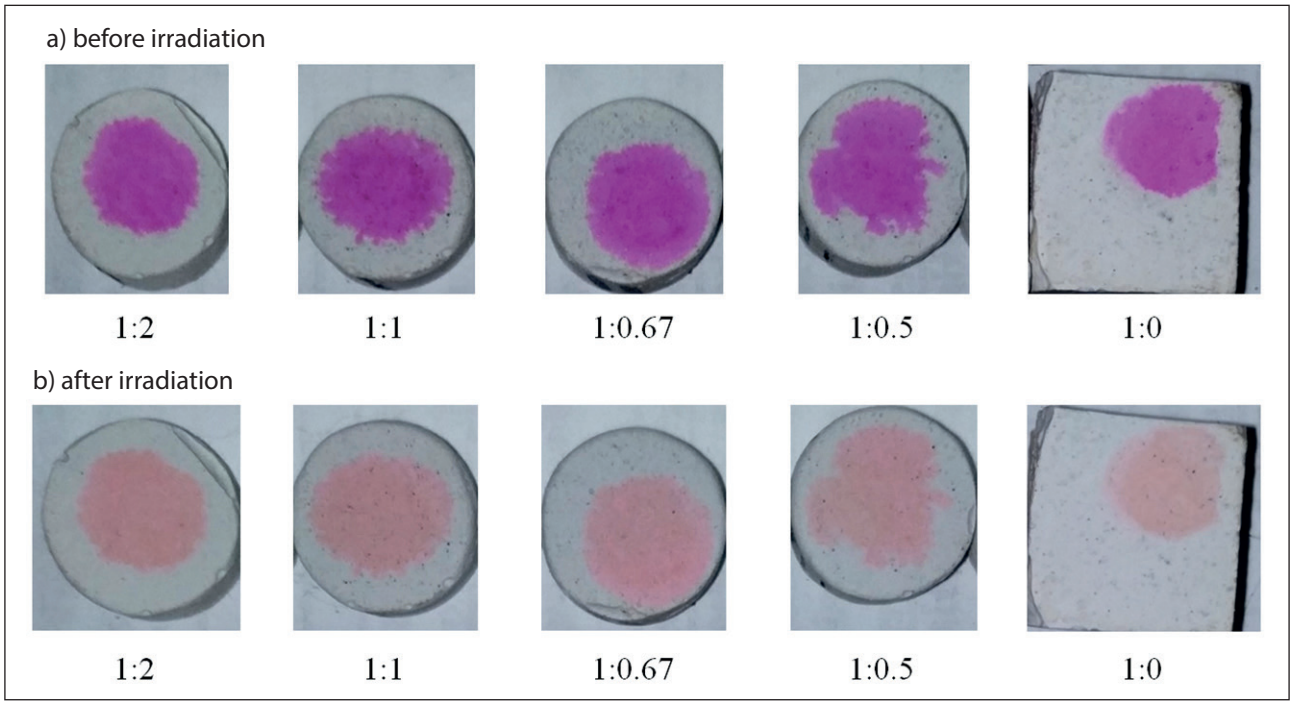


Fig. 4. Photographs of cement samples before and after 26-hour irradiation

Table 2. Color degradation on the cement sample surface

TiO_2/SiO_2	Color degradation after 4-hour irradiation, %	Color degradation after 26-hour irradiation, %	Compliance with the requirements for self-cleaning materials as per UNI 11259-2016
1:2	42.0	49.2	self-cleaning
1:1	44.6	53.5	self-cleaning
1:0.67	45.3	56.1	self-cleaning
1:0.5	46.5	57.3	self-cleaning
1:0	46.9	58.0	self-cleaning

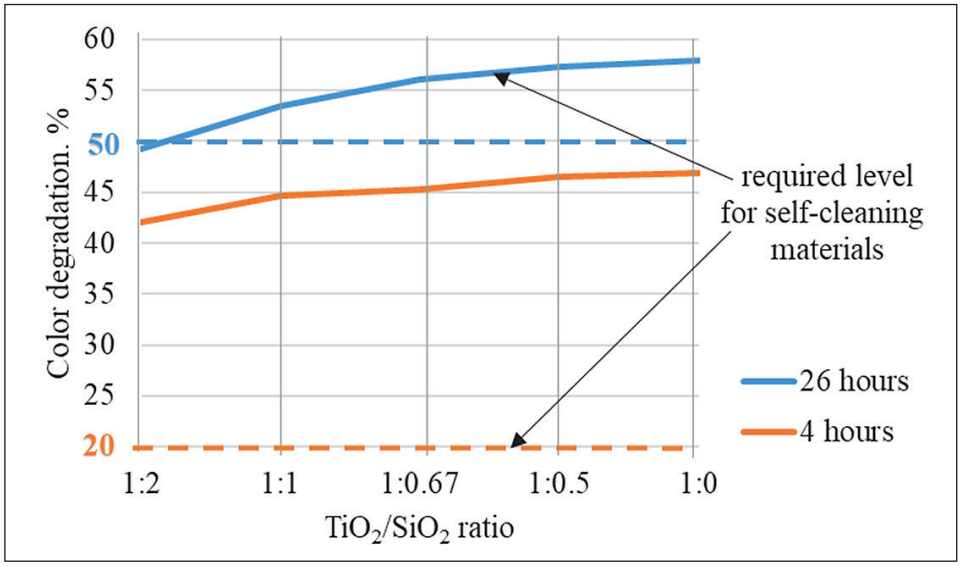


Fig. 5. The dependence of color degradation on the cement sample surface on the TiO_2/SiO_2 ratio

CONCLUSION

We synthesized a series of anatase-silica additives by depositing anatase on the surface of microsilica using sol-gel technology, varying the amount of anatase relative to the substrate in the range of TiO_2/SiO_2 ratios from 1:2 to 1:0.5. Electron microscopy showed that anatase is distributed over the surface of the microsilica in a uniform layer and the surface coverage area increases with an increase in the amount of microsilica. In the range of oxide ratios, microsilica particles are not completely covered with anatase, but over most of the surface. This is confirmed by a nonlinear increase in anatase reflections in diffraction patterns with an increase in the TiO_2/SiO_2 ratio and by calculating the surface coverage area taking into account the 118–155 nm size of anatase crystallites, if we assume that anatase crystallites are distributed over the surface in a single layer.

With an increase in TiO_2 relative to SiO_2, the self-cleaning efficiency increases and reaches the required level when the ratio of oxides in the additive is slightly less than 1:1, which means that 1 g of TiO_2 is enough per specific surface area of the substrate of about 22 m^2 to create an effective photocatalytic additive. The results can be used in the production of technically and economically effective photocatalytic additives for self-cleaning cements.

REFERENCES

1. Ragesh P., Anand Ganesh V., Nair S. V., Nair A.S. A review on “self-cleaning and multifunctional materials.” *Journal of Materials Chemistry A*. 2014; 2(36): 14773-14797. https://doi.org/10.1039/c4ta02542c

2. Topçu I.B., Akkan E., Uygunoğlu T., Çalişkan K. Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Journal of Cement Based Composites*. 2020; 1(2): 6-12. https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.002

3. Neves J.C., Mohallem N.D.S., Viana M.M. Self-cleaning materials: Concepts, properties and applications. *Revista Virtual de Quimica*. 2021; 13(2). https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210003

4. Castro-Hoyos A.M., Rojas Manzano M.A., Maury-Ramírez A. Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*. 2022; 12(7): 1-21. https://doi.org/10.3390/coatings12070968

5. Hamidi F., Aslani F. TiO_2-based photocatalytic cementitious composites: Materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. *Nanomaterials*. 2019; 9(10): 1-33. https://doi.org/10.3390/nano9101444

6. Padmanabhan N.T., John H. Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020; 8(5): 1-22. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211

7. Li X., Simon U., Bekheet M.F., Gurlo A. Mineral-Supported Photocatalysts: A Review of Materials, Mechanisms and Environmental Applications. *Energies*. 2022; 15(15): 1-52.

8. Wang Z., Liu Y., Huang B., Dai Y., Lou Z., Wang G., Zhang X., Qin X. Progress on extending the light absorption spectra of photocatalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014; 16(7): 2758-2774. https://doi.org/10.1039/c3cp53817f

9. Strokova, V. V, Gubareva, E.N., Baskakov, P.S., Ogurtsova, Y.N., Antonenko, M.V, Abzalilova, A.V. Fotokataliticheskaya aktivnost` kompozicionnogo materiala, poluchennogo metodom zol`-gel` osazhdeniya tio2 na kremnezemny`j nositel`[Photocatalytic activity of composite material obtained by the method of sol-gel deposition of tio 2 on silica support] *Vestnik texnologicheskogo universiteta*. 2020; 23(10): 5–9 (In Russ.)

10. Drelich J., Marmur A. Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings. *Surface Innovations*. 2014; 2(4): 1-17. https://doi.org/10.1680/si.13.00017

11. Gubareva E.N., Strokova V.V., Ogurtsova Y.N., Baskakov P.S., Singh L.P. Composition and properties of tio2 sol to produce a photocatalytic composite material. *Key Engineering Materials*. 2020; 854: 45-50. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.45

12. Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V. Ispol`zovanie fotokataliticheskogo kompozicionnogo materiala v cementnoj sisteme [Use of the Photocatalytic Composite Material in the Cement System]. *Stroitel'nye Materialy*. 2019; 770(5): 16–21. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21 (In Russ.)

13. Son B.T., Long N.V., Nhat Hang N.T. Fly ash-, foundry sand-, clay-, and pumice-based metal oxide nanocomposites as green photocatalysts. *RSC Advances*. 2021; 11(49): 30805-30826. https://doi.org/10.1039/d1ra05647f

14. Cong Y., Zhang J., Chen F., Anpo M., He D. Preparation, photocatalytic activity, and mechanism of nano-TiO_2 Co-doped with nitrogen and iron (III). *Journal of Physical Chemistry C*. 2007; 111(28): 10618-10623. https://doi.org/10.1021/jp0727493

15. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO2 nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2014; 23(4): 1-8. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.09.010

16. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. Preparation and photocatalytic activity of iron-modified titanium dioxide photocatalyst. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2012; 48(1): 193-200.

17. Pal B., Sharon M., Nogami G. Preparation and characterization of TiO_2/Fe_2O_3 binary mixed oxides and its photocatalytic properties. *Materials Chemistry and Physics*. 1999; 59(3): 254-261. https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00071-1

18. Torres-Luna J.A., Sanabria N.R., Carriazo J.G. Powders of iron(III)-doped titanium dioxide obtained by direct way from a natural ilmenite. *Powder Technology*. 2016; 302: 254-260. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.056

19. Arakelyan G.A., Karapetyan A.K., Badalyan M.M., Ghahramanyan A.A., Makarov E.M. Increasing the Efficiency of Fine-Grained Lightweight Concrete Using Complex Additives. *Journal of Architectural and Engineering Research*. 2022; 2: 3-8. https://doi.org/10.54338/27382656-2022.2-001

20. Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A. Analysis of Experience in the Use of Micro- and Nanoadditives from Silicon Production Waste in Concrete Technologies. *Minerals*. 2023; 13(12): 1-34.

21. Žvironaitė J., Pundienė I., Gaidučis S., Kizinievič V. Effect of different pozzolana on hardening process and properties of hydraulic binder based on natural anhydrite. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012; 18(4): 530-536. https://doi.org/10.3846/13923730.2012.702126

22. Amrhein K., Stephan D. Principles and test methods for the determination of the activity of photocatalytic materials and their application to modified building materials. *Photochemical and Photobiological Sciences*. 2011; 10(3): 338–342. https://doi.org/10.1039/c0pp00155d

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tamara N. Chernykh – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Building Materials and Products, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, chernykhtn@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4288-2115

Polina I. Kiiko – Lecturer at the Department of Building Materials and Products, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, kiikopi@susu.ru, https://orcid.org/0009-0002-4083-8804

Mikhail V. Kriushin – Junior Researcher Department of Building Materials and Products, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, kriushinmv@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6425-4531

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Tamara N. Chernykh – scientific supervision; research concept; participation in the experiment; analysis of experimental results; text revision; final conclusions.

Polina I. Kiiko – participation in the experiment; analysis of experimental results; original text; final. conclusions

Mikhail V. Kriushin – participation in the experiment; analysis of experimental results.

The authors declare no conflict of interests.

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 30.01.2025; accepted for publication 05.02.2025.

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Научная статья / Original article
УДК 691.3
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13

CC BY 4.0

Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов

Тамара Николаевна Черных*, **Полина Игоревна Кийко**, **Михаил Владимирович Криушин**
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: chernykhtn@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Стоимость анатазных добавок для бетонов можно снизить за счет их синтеза путем нанесения на минеральную подложку, которая может быть активной по отношению к цементу, в частности перспективно нанесение анатаза на минеральные порошки, подобные микрокремнезему. В данной работе описан синтез анатаз-кремнеземистых фотокатализаторов с различным соотношением анатаза и кремнезема и оценена их эффективность для материалов на основе цемента. **Материалы и методы.** Фотокаталитическая добавка была получена путем нанесения TiO_2 на подложку из микрокремнезема с использованием золь-гель технологии. Физико-химические исследования включали рентгенофазовый анализ и электронную сканирующую микроскопию. Для определения самоочищения использовали родамин-тест. **Результаты и обсуждения.** Увеличение соотношения TiO_2/SiO_2 увеличивает площадь микрокремнезема, покрытую анатазом, и высоту основных отражений анатаза при рентгенофазовом анализе. Однако увеличение интенсивности рефлексов анатаза не пропорционально изменению соотношения TiO_2/SiO_2 при близком размере кристаллитов анатаза. С увеличением TiO_2 относительно SiO_2 эффективность самоочистки возрастает и достигает необходимого уровня при соотношении оксидов в добавке чуть менее 1:1, что соответствует 1 г TiO_2 на удельную поверхность подложки 22 м^2 и обеспечивает создание эффективной фотокаталитической добавки. **Заключение.** Путем варьирования количества анатаза по отношению к подложке в диапазоне соотношений TiO_2/SiO_2 от 1:2 до 1:0,5 было установлено оптимальное соотношение TiO_2/SiO_2, равное 1:1. Результаты могут быть использованы при производстве технически и экономически эффективных фотокаталитических добавок для самоочищающихся материалов на основе цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Самоочищающиеся, анатазные добавки, анатазо-кремнеземные фотокатализаторы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Черных Т.Н., Кийко П.И., Криушин М.В. Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):5–13. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13. – EDN: UCUMYT.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья / Original article
УДК 691.3
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13

CC BY 4.0

Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов

Тамара Николаевна Черных*, **Полина Игоревна Кийко**, **Михаил Владимирович Криушин**
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: chernykhtn@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Стоимость анатазных добавок для бетонов можно снизить за счет их синтеза путем нанесения на минеральную подложку, которая может быть активной по отношению к цементу, в частности перспективно нанесение анатаза на минеральные порошки, подобные микрокремнезему. В данной работе описан синтез анатаз-кремнеземистых фотокатализаторов с различным соотношением анатаза и кремнезема и оценена их эффективность для материалов на основе цемента. **Материалы и методы.** Фотокаталитическая добавка была получена путем нанесения TiO_2 на подложку из микрокремнезема с использованием золь-гель технологии. Физико-химические исследования включали рентгенофазовый анализ и электронную сканирующую микроскопию. Для определения самоочищения использовали родамин-тест. **Результаты и обсуждения.** Увеличение соотношения TiO_2/SiO_2 увеличивает площадь микрокремнезема, покрытую анатазом, и высоту основных отражений анатаза при рентгенофазовом анализе. Однако увеличение интенсивности рефлексов анатаза не пропорционально изменению соотношения TiO_2/SiO_2 при близком размере кристаллитов анатаза. С увеличением TiO_2 относительно SiO_2 эффективность самоочистки возрастает и достигает необходимого уровня при соотношении оксидов в добавке чуть менее 1:1, что соответствует 1 г TiO_2 на удельную поверхность подложки 22 м^2 и обеспечивает создание эффективной фотокаталитической добавки. **Заключение.** Путем варьирования количества анатаза по отношению к подложке в диапазоне соотношений TiO_2/SiO_2 от 1:2 до 1:0,5 было установлено оптимальное соотношение TiO_2/SiO_2, равное 1:1. Результаты могут быть использованы при производстве технически и экономически эффективных фотокаталитических добавок для самоочищающихся материалов на основе цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Самоочищающиеся, анатазные добавки, анатазо-кремнеземные фотокатализаторы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Черных Т.Н., Кийко П.И., Криушин М.В. Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):5–13. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13. – EDN: UCUMYT.

Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement

Tamara N. Chernykh*, **Polina I. Kiiko**, **Mikhail V. Kriushin**
South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia
* Corresponding author: e-mail: chernykhtn@susu.ru

ABSTRACT

Introduction. The cost of anatase additives to concrete can be lowered by synthesizing it and applying it to a mineral substrate that is active against cement. In particular, the use of anatase in mineral powders such as silica shows promise. This paper describes the synthesis of anatase-silica photocatalysts with varying anatase to silica ratios and evaluates their performance in cement-based

© Черных Т.Н., Кийко П.И., Криушин М.В., 2025

materials. **Materials and methods.** The photocatalytic additive was obtained by TiO_2 deposition on the microsilica substrate using sol-gel technology. The physicochemical studies included X-ray phase analysis and electron scanning microscopy. To determine the self-cleaning, we used the rhodamine test. **Results and discussion.** An increase in the TiO_2/SiO_2 ratio increases the area covered with anatase and the height of the main anatase reflections in the X-ray phase analysis. But the increase in the anatase reflection intensity is not proportional to the change in the TiO_2/SiO_2 ratio with the same size of anatase crystallites. With an increase in TiO_2 relative to SiO_2, the self-cleaning efficiency increases and reaches the required level when the ratio of oxides in the additive is slightly less than 1:1. It means that 1 g of TiO_2 is enough per specific surface area of the substrate 22 m^2 to create an effective photocatalytic additive. **Conclusion.** The optimal TiO_2/SiO_2 ratio of 1:1 was revealed by varying the amount of anatase relative to the substrate in the range of TiO_2/SiO_2 ratios from 1:2 to 1:0.5. The results can be used in the production of technically and economically effective photocatalytic additives for self-cleaning materials based on cement.

KEYWORDS: Self-cleaning, anatase additives, anatase-silica photocatalysts

FOR CITATION:
Chernykh T.N., Kiiko P.I., Kriushin M.V. Anatase-silica additive for self-cleaning materials based on cement. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(1):5–13. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-5-13. – EDN: UCUMYT.

ВВЕДЕНИЕ

Самоочищающиеся строительные материалы – это инновационные материалы, способные очищать себя от загрязнений или бактерий без вмешательства человека. В сфере строительства их применение наиболее эффективно в фасадных отделках, особенно для зданий и сооружений вблизи промышленных предприятий и автомагистралей. Применение самоочищающихся материалов в фасадах может значительно продлить их срок службы за счет более длительного сохранения архитектурного облика зданий, чем при использовании традиционных материалов.

В течение последних нескольких десятилетий было разработано множество различных стратегий самоочистки поверхностей [1]. Наиболее перспективной из них для строительных материалов на основе минеральных вяжущих представляется использование фотокаталитически активных добавок, способных при активации солнечным светом разлагать органические вещества на поверхности и вблизи ее, а также придавать поверхности свойство супергидрофильности [2]. На супергидрофильных поверхностях капли воды образуют тонкую пленку, которая вклинивается между основанием и загрязнителями, смывая их [3]. Среди различных добавок-фотокатализаторов наиболее широкое распространение получил нано- и микроразмерный оксид титана в анатазной модификации. Анатазная форма оксида титана обеспечивает добавкам высокую фотокаталитическую активность при достаточно высоком значении ширины запрещенной зоны, равной 3,2 эВ, которое соответствует свету ближнего ультрафиолета с длиной волны 390 нм [4–6]. Такое излучение является частью солнечного спектра, но эффективность работы фотокатализатора под действием видимого излучения составляет менее 10 % [7, 8], кроме того анатазные добавки-фотокатализаторы имеют очень высокую стоимость, что сдерживает широкое внедрение самоочищающихся строительных материалов в строительную практику.

Для снижения стоимости анатазных добавок эффективно проводить их синтез путем осаждения на минеральной подложке, которая может иметь активность по отношению к вяжущему [9–13] или обладать собственной фотокаталитической активностью для расширения спектра излучения, запускающего процесс фотокатализа [14–18].

Перспективным представляется осаждение анатаза на минеральных порошках, традиционно применяемых для производства цементных материалов в качестве активных минеральных добавок, обладающих высокоразвитой поверхностью и стабильностью до 550 С, т.к. до этой температуры нагревается добавка при синтезе.

К одной из эффективных и наиболее распространенных пуццолановых добавок в бетоны в настоящее время относится микрокремнезем. Являясь побочным продуктом производства, что обуславливает его невысокую стоимость, микрокремнезем имеет высокоразвитую поверхность и высокую способность к связыванию портландита, что определяет его эффективность и популярность [19–21].

В связи с этим получение комплексной добавки из анатаза, осажденного на микрокремнеземе, для фасадных цементных материалов является целесообразным и экономически выгодным.

Задачами работы являлись синтез анатазкремнеземистого фотокатализатора с различным соотношением анатаза и кремнезема и оценка его эффективности для материалов на цементной основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для синтеза фотокатализатора в качестве источника оксида титана использовали тетрабутоксититан

(производство ООО «ПромХимПермь», ТУ 6-09-2738-09), в качестве подложки для осаждения оксида титана применяли микрокремнезем МК-85 (производство АО «ЧЭМК» ГОСТ Р 58894-2020) с массовой долей оксида кремния 85 % и удельной поверхностью 12,5 м^2/г. Для повышения однородности распределения оксида титана по поверхности подложки применяли неионогенное поверхностно-активное вещество ОП-10 (ЗАО «Союзхимпром»).

Получение фотокаталитической добавки осаждением оксида титана на подложке проводили методом золь-гель технологии [9]. Синтез включал следующие этапы: растворение поверхностно-активной добавки (ОП-10) в этиловом спирте при перемешивании в магнитной мешалке в течение 5 минут, последовательное введение в смесь порошка микрокремнезема и тетрабутоксититана при постоянном перемешивании в магнитной мешалке в течение 30 минут, сушка (старение геля) в течение 24 часов в лабораторной камерной сушилке при 115 °С, обжиг в лабораторной камерной печи в течение 2 часов при температуре 550 °С.

В качестве вяжущего для создания составов декоративных штукатурок применяли портландцемент белый ПЦБ 1-500Д0 ГОСТ 965-89 (производство ООО «Цемикс»).

Физико-химический комплекс исследований добавок включал рентгено-фазовый анализ на дифрактометре Ultima IV X-ray и электронную растровую микроскопию с помощью комплекса сканирующей электронной микроскопии Jeol JSM-7001F, EDS Oxford INCA X-max 80, WDS Oxford INCA WAVE, EBSD и HKL. Важной особенностью подготовки проб для анализа являлось то, что пробы добавок не измельчали, это было необходимо для максимального сохранения структуры добавки, при котором можно косвенно оценить покрытие частиц микрокремнезема анатазом.

Для определения самоочищения цементного камня использовали родамин-тест, описанный в итальянском стандарте UNI11259-2016 [22], который позволяет оценить эффективность самоочищения количественно и оценить, является ли материал самоочищающимся. Были использованы лампа-облучатель с длиной волны 390 нм и органический краситель – родамин В. При испытаниях часть образцов окрашивают раствором красителя родамин В концентрации $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л в количестве 3,84 мл/см^2, фотографируют и помещают под УФ-лампу. По истечении 4 и 26 часов образцы фотографируют для регистрации изменения цвета. Параметры фотографирования: полная темнота, в качестве источника света – вспышка. Настройки фотоаппарата: фокусное расстояние f/1,8, светочувствительность ISO400, баланс белого 4000, выдержка 1/250 сек. Измерение цвета поверхности (эффективность деградации красителя) проводили при помощи программного обеспечения ImageJ по координатам RGB, которые преобразуются в системе CIELAB с использованием цветовых координат L* a* b*, где L – светимость, a и b – координаты колориметрии, которые представляют собой измерение цветового тона в двухмерной плоскости. Изменение цвета между исходным цветом материала и цветом с нанесенным красителем рассчитывается по формуле:

$$E_{исх} = \sqrt{(L_{исх} - L_0)^2 + (a_{исх} - a_0)^2 + (b_{исх} - b_0)^2}, \quad (1)$$

где $L_{исх}$, $a_{исх}$, $b_{исх}$ – координаты в системе CIELAB исходного цвета материала на фотографии;

L_0, a_0, b_0 – координаты в системе CIELAB цвета окрашенной поверхности на фотографии сразу после нанесения красителя.

Изменение цвета между исходным цветом материала и цветом с нанесенным красителем после облучения в течение t часов рассчитывается по формуле:

$$E_t = \sqrt{(L^*_{исх} - L_t)^2 + (a^*_{исх} - a_t)^2 + (b^*_{исх} - b_t)^2}, \quad (2)$$

где $L^*_{исх}$, $a^*_{исх}$, $b^*_{исх}$ – координаты в системе CIELAB исходного цвета материала на фотографии после облучения в течение t часов;

L_t, a_t, b_t – координаты в системе CIELAB цвета окрашенной поверхности на фотографии после облучения в течение t часов.

Расчет эффективности деградации цвета (%) равен:

$$R_E = \frac{|E_t - E_{исх}|}{E_{исх}}.$$

При достижении показателя 20 % после 4 часов и 50 % после 26 часов материал считается самоочищающимся.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соотношение компонентов для синтеза анатаз-кремнеземистой добавки выбирали исходя из соотношения оксидов титана и кремния после окончания синтеза, количество компонентов на один лабораторный синтез приведено в табл. 1.

Оценку покрытия поверхности микрокремнезема анатазом проводили с помощью электронной микроскопии, микрофотографии приведены на рис. 1.

На микрофотографии добавки с минимальным содержанием оксида титана (рис.1а, состав № 1 по табл. 1) видно, что оксид титана располагается по поверхности частиц микрокремнезема отдельными участками, покрывающими не более 10% по-

верхности. Элементный анализ также показывает относительно небольшое количество титана относительно кремния, что подтверждает недостаток оксида титана для покрытия поверхности частиц микрокремнезема. Увеличение соотношения TiO_2/SiO_2 приводит к увеличению площади микрокремнезема, покрытой анатазом (рис. 1б, 1в и 1г). На спектрах элементного анализа также видно, что количество TiO_2 относительно SiO_2 увеличивается, что подтверждает увеличение площади распределения анатаза по поверхности частиц микрокремнезема. Необходимо отметить, что даже при максимальном количестве анатаза относительно микрокремнезема в выбранном диапазоне варьирования отражения кремния не пропадают полностью, т.е. частицы не полностью покрываются анатазом.

Таблица 1. Соотношение исходных компонентов для синтеза добавок

Соотношение TiO_2/SiO_2 в добавке	Спирт этиловый, г	ПАВ ОП-10, г	Тетрабутоксититан, г	Микрокремнезем, г
1:2	36,0	4,0	7,17	4,0
1:1	72,0	4,0	14,33	4,0
1:0,67	108,0	4,0	21,50	4,0
1:0,5	144,0	4,0	28,67	4,0
1:0	36,0	4,0	7,17	0,0

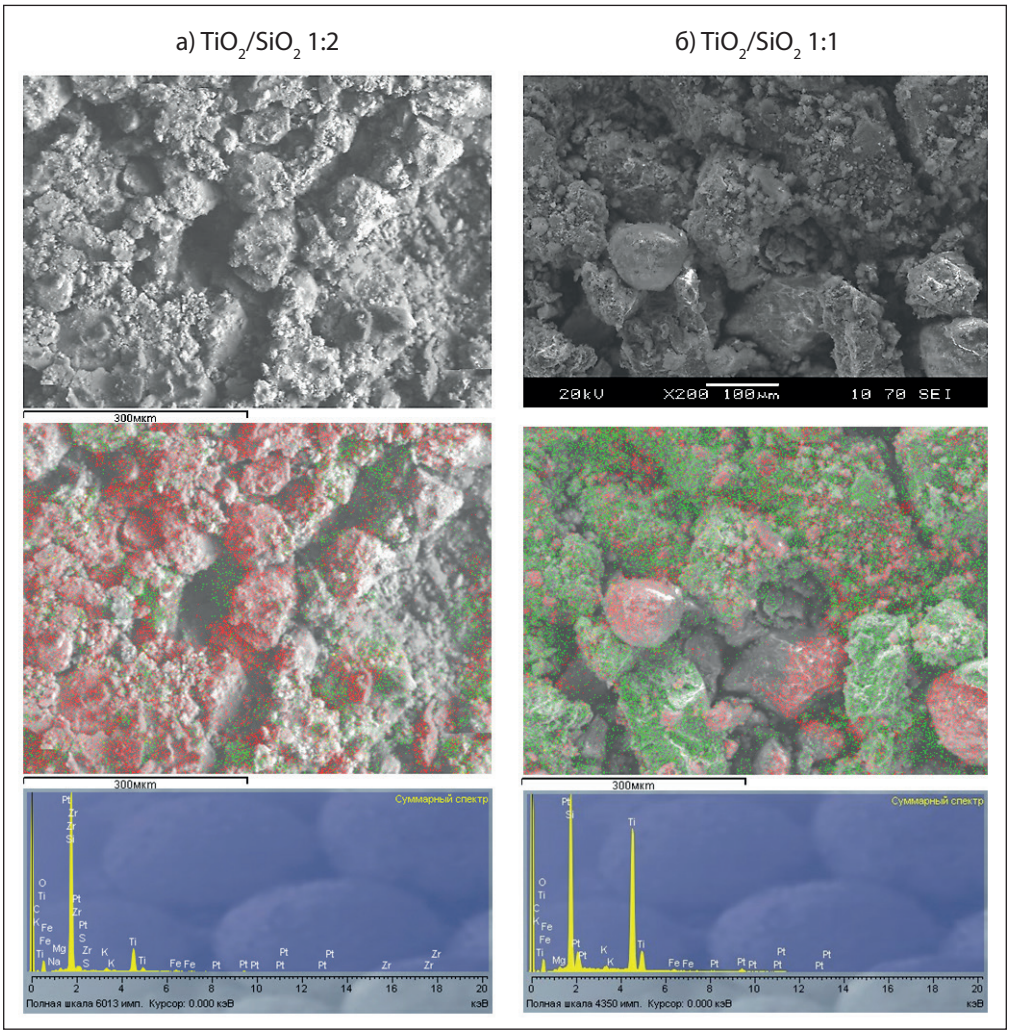


Рис. 1. Микрофотографии добавок с различным отношением TiO_2/SiO_2

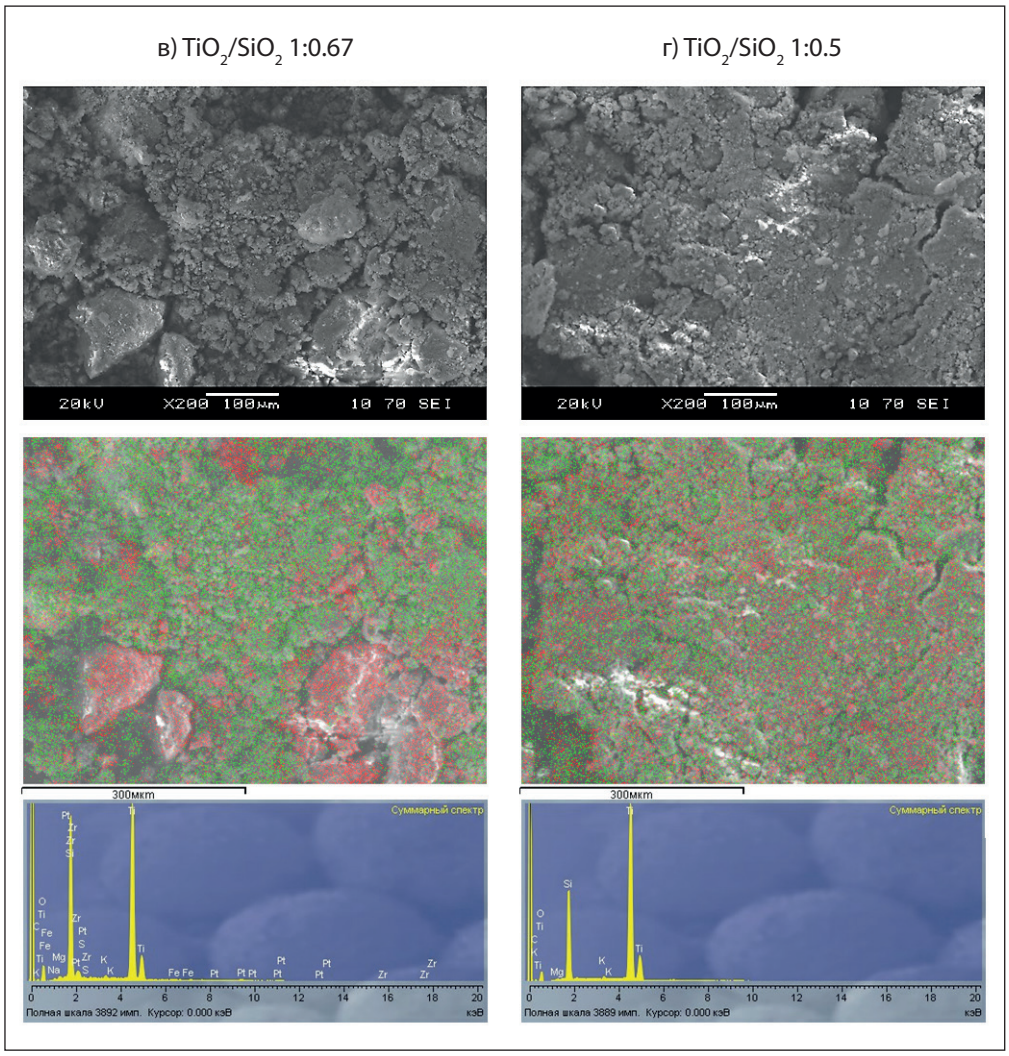


Рис. 1. Окончание

Рентгенофазовый анализ подтверждает формирование оксида титана в требуемой модификации анатаза, притом что на дифрактограммах при увеличении соотношения TiO_2/SiO_2 закономерно увеличивается высота основных отражений анатаза (рис. 2).

Также установлено, что увеличение интенсивности отражений анатаза при рентгено-фазовом анализе добавок с ненарушенным осажденным слоем не пропорционально изменению соотношения TiO_2/SiO_2, полученная зависимость имеет вид, близкий к логарифмическому (рис. 3).

Анализ ширины дифракционных отражений анатаза на их полувысоте показывает, что колебания ширины пиков незначительны, что говорит о близком размере кристаллитов образующегося анатаза, который составляет 125–145 нм для hkl 101 и 118–155 нм для hkl 200. Учитывая удельную поверхность микрокремнезема, очевидно, что при таком размере частицы анатаза не способны полностью покрыть поверхность микрокремнезема, однако с точки зрения создания фотокаталитической добавки полное покрытие подложки не является целью, важнее обеспечить равномерное распределение анатаза по поверхности не более чем в один слой для обеспечения максимальной площади взаимодействия при минимальном расходе оксида титана.

Для выявления оптимального соотношения TiO_2/SiO_2 в добавке по принципу придания способности к самоочищению провели родамин-тест на образцах-таблетках из цементного камня (изготовлены из теста нормальной густоты) с полученными добавками в количестве 1 %. Фотографии образцов до и после облучения в течение 26 часов приведены на рис. 4, результаты обработки изображений – в табл. 2 и на графике (рис. 5).

Согласно полученной зависимости, при увеличении оксида титана по отношению к оксиду кремния в составе исследуемых образцов эффективность к са-

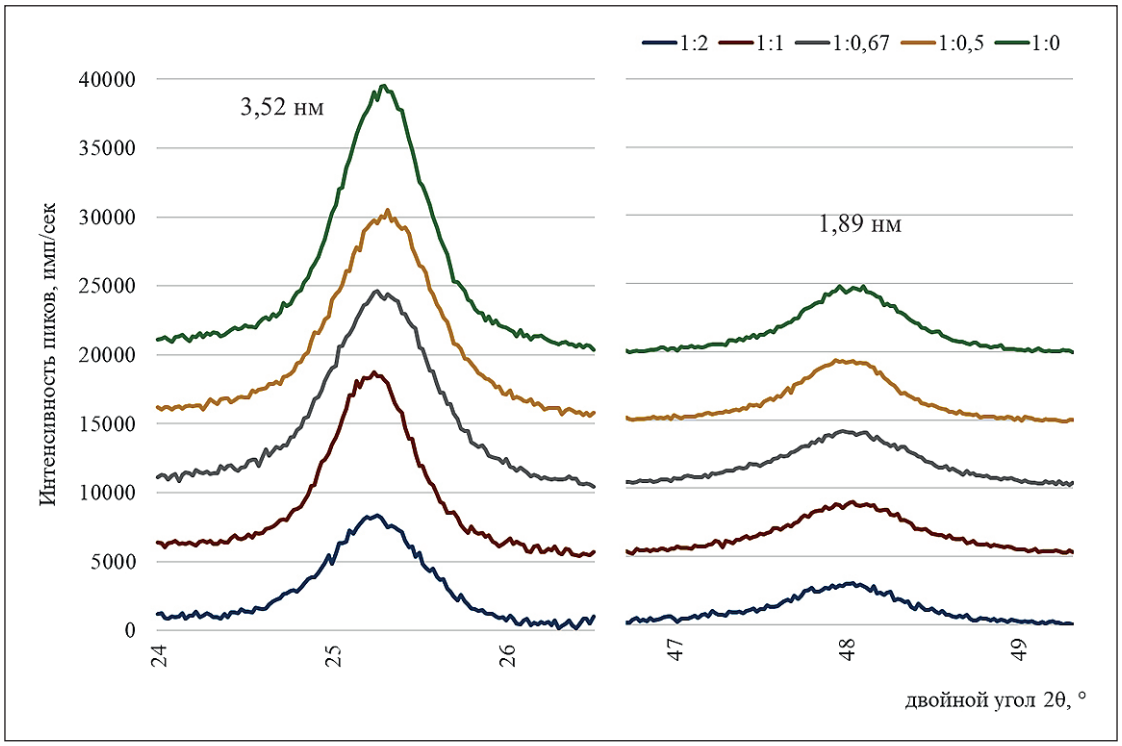


Рис. 2. Основные дифракционные отражения анатаза на дифрактограммах

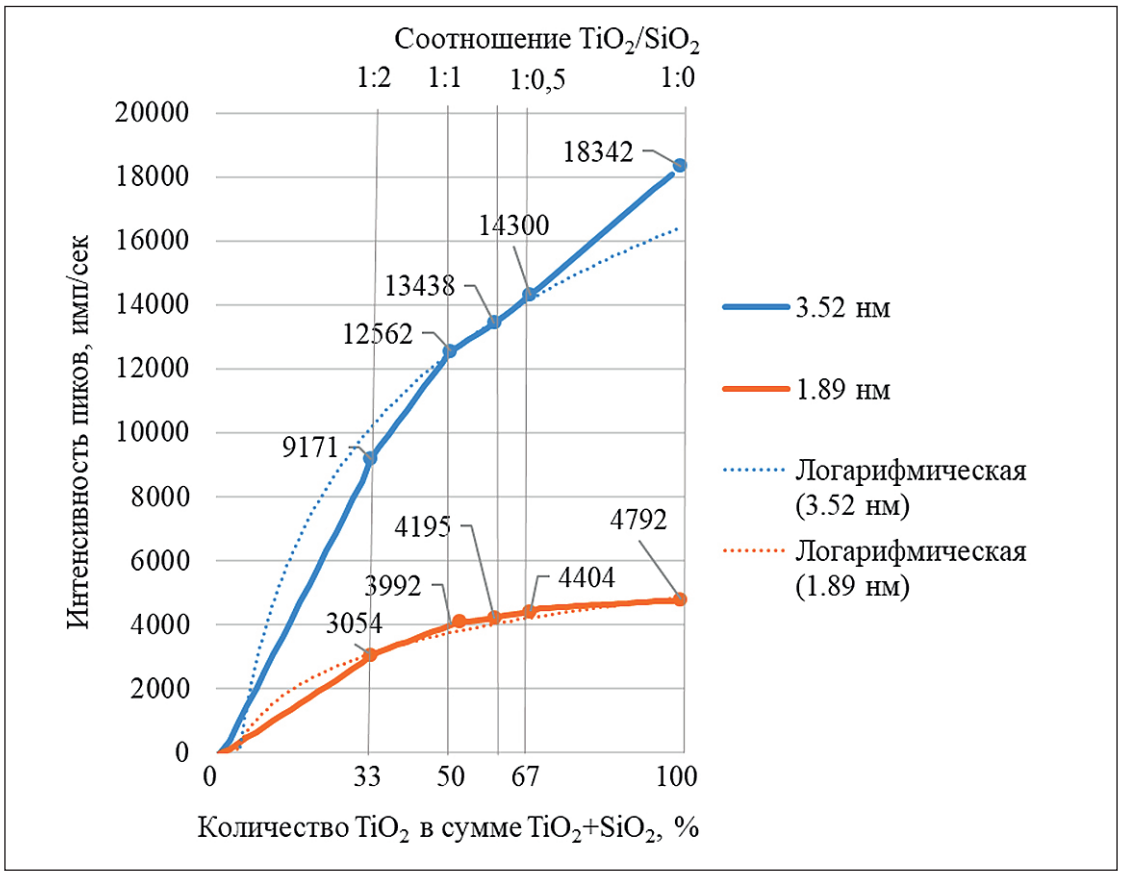


Рис. 3. Зависимость высоты пика от соотношения TiO_2/SiO_2 в исходной смеси для синтеза добавки

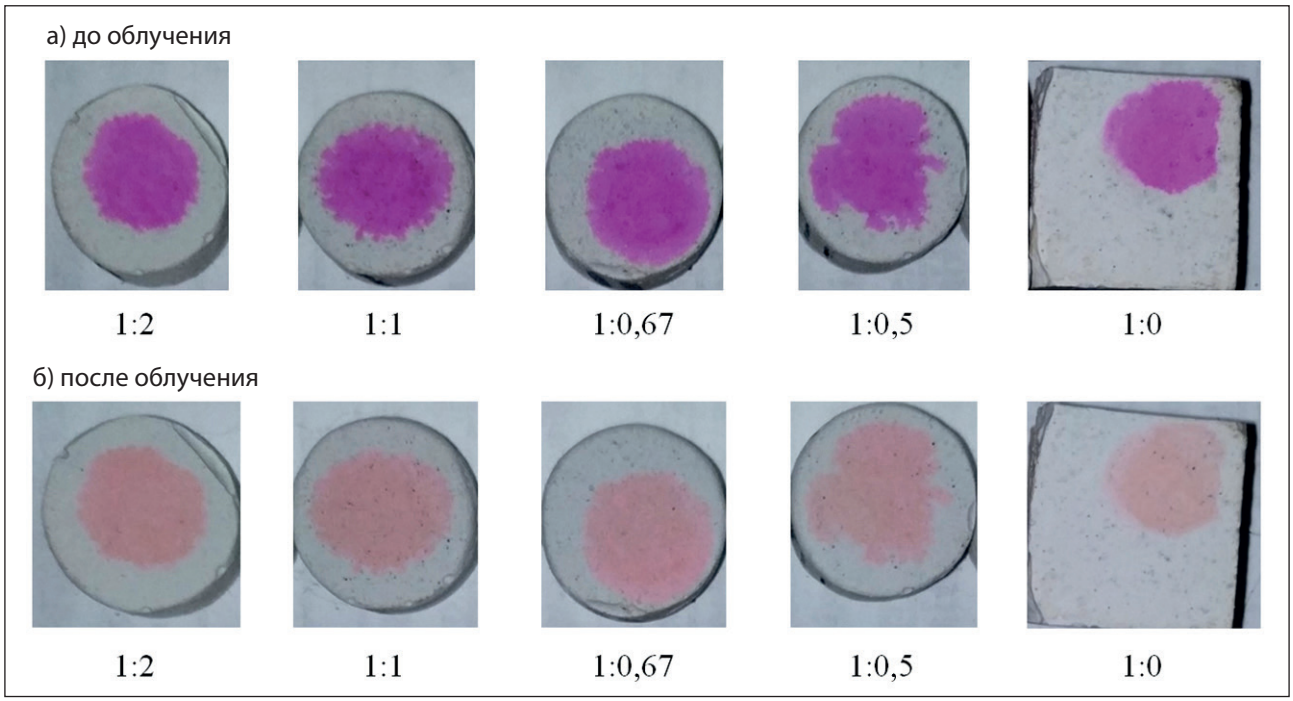


Рис. 4. Фотографии цементных образцов до и после облучения в течение 26 часов

Таблица 2. Деградация цвета на поверхности цементных образцов

TiO_2/SiO_2	Деградация цвета после облучения в течение 4 часов, %	Деградация цвета после облучения в течение 26 часов, %	Соответствие требованиям к самоочищающимся материалам по UNI 11259-2016
1:2	42,0	49,2	самоочищающийся
1:1	44,6	53,5	самоочищающийся
1:0,67	45,3	56,1	самоочищающийся
1:0,5	46,5	57,3	самоочищающийся
1:0	46,9	58,0	самоочищающийся

моочищению возрастает и уверенно достигает требуемого уровня при соотношении оксидов в добавке чуть менее 1:1, что соответствует расходу оксида титана 1 г на площадь удельной поверхности микрокремнезема около 22 м^2. Большее распределение фотокаталитической добавки по поверхности микрокремнеземной подложки увеличивает эффективность добавки, однако и возрастает стоимость добавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена линейка анатазкремнеземистых добавок осаждением анатаза на поверхности микрокремнезема при синтезе методом золь-гель технологии с варьированием количества анатаза относительно подложки в диапазоне соотношений TiO_2/SiO_2 от 1:2 до 1:0,5. Методом электронной микроскопии показано, что анатаз распределяется по поверхности микрокремнезема равномерным слоем и при увеличении его количества площадь покрытия поверхности увеличивается. При этом в выбранном диапазоне соотношений оксидов частицы микрокремнезема покрываются анатазом не полностью, но по большей части поверхности. Это подтверждается нелинейным ростом отражений анатаза на дифрактограммах при увеличении соотношения TiO_2/SiO_2 и расчетом площади покрытия поверхности с учетом размеров кристаллитов анатаза 118–155 нм при том допущении, что кристаллиты анатаза распределяются по поверхности в один слой.

При увеличении оксида титана по отношению к оксиду кремния эффективность к самоочищению возрастает и достигает требуемого уровня при соотношении оксидов в добавке чуть менее 1:1, это позволяет говорить о том, что для создания эффективной фотокаталитической добавки на кремнеземистой подложке достаточно использовать 1 г

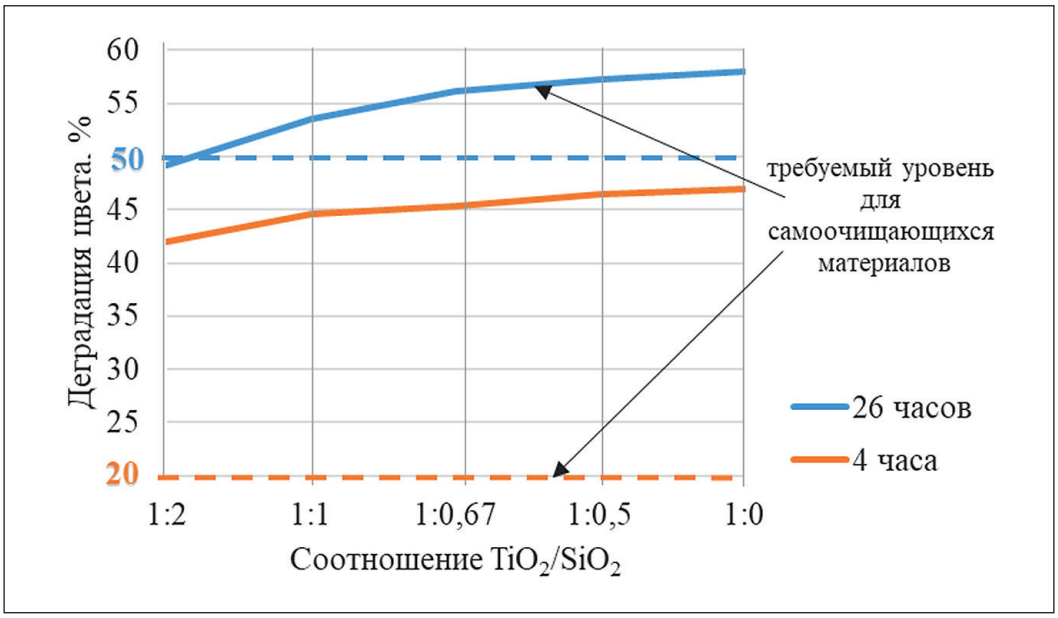


Рис. 5. Зависимость деградации цвета на поверхности цементных образцов от соотношения TiO_2/SiO_2

оксида титана на площадь удельной поверхности кремнеземистой подложки около 22 м^2. Полученные результаты имеют потенциал для применения в производстве технически и экономически эффективных фотокаталитических добавок для самоочищающихся цементных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ragesh, P., Anand Ganesh, V., Nair, S. V., Nair, A.S. A review on “self-cleaning and multifunctional materials.” *Journal of Materials Chemistry A*. 2014: 2(36): 14773-14797. https://doi.org/10.1039/c4ta02542c

2. Topçu I.B., Akkan E., Uygunoğlu T., Çalişkan K. Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Journal of Cement Based Composites*. 2020: 1(2): 6-12. https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.002

3. Neves J.C., Mohallem N.D.S., Viana M.M. Self-cleaning materials: Concepts, properties and applications. *Revista Virtual de Quimica*. 2021: 13(2). https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210003

4. Castro-Hoyos A.M., Rojas Manzano M.A., Maury-Ramírez A. Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*. 2022: 12(7): 1-21. https://doi.org/10.3390/coatings12070968

5. Hamidi F., Aslani F. TiO2-based photocatalytic cementitious composites: Materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. *Nanomaterials*. 2019: 9(10): 1-33. https://doi.org/10.3390/nano9101444

6. Padmanabhan N.T., John H. Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020: 8(5): 1-22. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211

7. Li X., Simon U., Bekheet M.F., Gurlo A. Mineral-Supported Photocatalysts: A Review of Materials, Mechanisms and Environmental Applications. *Energies*. 2022: 15(15): 1-52.

8. Wang Z., Liu Y., Huang B., Dai Y., Lou Z., Wang G., Zhang X., Qin X. Progress on extending the light absorption spectra of photocatalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014: 16(7): 2758-2774. https://doi.org/10.1039/c3cp53817f

9. Строкова В.В., Губарева Е.Н., Баскаков П.С., Огурцова Ю.Н., Антоненко М.В., Абзалилова А.В. Фотокаталитическая активность композиционного материала, полученного методом золь-гель осаждения TIO_2 на кремнеземный носитель. *Вестник технологического университета*. 2020:23(10):5-9.

10. Drelich J., Marmur A. Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings. *Surface Innovations*. 2014: 2(4): 1-17. https://doi.org/10.1680/si.13.00017

11. Gubareva E.N., Strokova V.V., Ogurtsova Y.N., Baskakov P.S., Singh L.P. Composition and properties of tio2 sol to produce a photocatalytic composite material. *Key Engineering Materials*. 2020: 854: 45-50. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.45

12. Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе. *Строительные материалы*. 2019:5:16-21. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21

13. Son B.T., Long N.V., Nhat Hang N.T. Fly ash-, foundry sand-, clay-, and pumice-based metal oxide nanocomposites as green photocatalysts. *RSC Advances*. 2021: 11(49): 30805-30826. https://doi.org/10.1039/d1ra05647f

14. Cong Y., Zhang J., Chen F., Anpo M., He D. Preparation, photocatalytic activity, and mechanism of nano-TiO_2 Co-doped with nitrogen and iron (III). *Journal of Physical Chemistry C*. 2007: 111(28): 10618-10623. https://doi.org/10.1021/jp0727493

15. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO_2 nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2014: 23(4): 1-8. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.09.010

16. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. Preparation and photocatalytic activity of iron-modified titanium dioxide photocatalyst. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2012: 48(1): 193-200.

17. Pal B., Sharon M., Nogami G. Preparation and characterization of TiO_2/Fe_2O_3 binary mixed oxides and its photocatalytic properties. *Materials Chemistry and Physics*. 1999: 59(3): 254-261. https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00071-1

18. Torres-Luna J.A., Sanabria N.R., Carriazo J.G. Powders of iron(III)-doped titanium dioxide obtained by direct way from a natural ilmenite. *Powder Technology*. 2016: 302: 254-260. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.056

19. Arakelyan G.A., Karapetyan A.K., Badalyan M.M., Ghahramanyan A.A., Makarov E.M. Increasing the Efficiency of Fine-Grained Lightweight Concrete Using Complex Additives. *Journal of Architectural and Engineering Research*. 2022: 2: 3-8. https://doi.org/10.54338/27382656-2022.2-001

20. Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A. Analysis of Experience in the Use of Micro- and Nanoadditives from Silicon Production Waste in Concrete Technologies. *Minerals*. 2023: 13(12): 1-34.

21. Žvironaitė J., Pundienė I., Gaidučis S., Kizinievič V. Effect of different pozzolana on hardening process and properties of hydraulic binder based on natural anhydrite. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012: 18(4): 530-536. https://doi.org/10.3846/13923730.2012.702126

22. Amrhein K., Stephan D. Principles and test methods for the determination of the activity of photocatalytic materials and their application to modified building materials. *Photochemical and Photobiological Sciences*. 2011: 10(3): 338–342. https://doi.org/10.1039/c0pp00155d

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черных Тамара Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, chernykhtn@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4288-2115

Кийко Полина Игоревна – преподаватель кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, kiikopi@susu.ru, https://orcid.org/0009-0002-4083-8804

Криушин Михаил Владимирович – младший научный сотрудник кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, kriushinmv@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6425-4531

ВКЛАД АВТОРОВ

Черных Т.Н. – научное руководство; концепция исследования; участие в проведении эксперимента; анализ результатов эксперимента; доработка текста; итоговые выводы.

Кийко П.И. – участие в проведении эксперимента; анализ результатов эксперимента; исходный текст; итоговые выводы.

Криушин М.В. – участие в проведении эксперимента; анализ результатов эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 30.01.2025; принята к публикации 05.02.2025.

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22

CC BY 4.0

Development of a concrete mixture composition utilizing a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms

Kristina V. Zhegera*, **Natalia A. Dasaeva**
Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
* Corresponding author: e-mail: jegera@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, additive technologies are widely used across various fields. Their application in construction addresses several critical challenges. In the 3D printing process of small architectural forms, it is very important to choose the right composition of the materials from which they will be made. **Materials and methods.** We used for composition development: synthesized aluminosilicates as a nanomodifying additive, Portland cement without additives 52.5N as a binder, fine filler quartz sand from the Ukhtinsky and Chaadaevsky deposits, complex additive Sika Antifreeze N9, and superplasticizers Axton and C-3. The water retention capacity of formulations using a nanomodifying additive was determined by the amount of water in the test composition before and after the tests. The kinetics of water absorption of the compositions was determined in accordance with the methodology presented in GOST 5802. Porosity was determined by the content of free and chemically bound water in the cement stone. The change in the normal density and setting time was determined using the Vic device. The intergranular voidness of the sand was calculated from the values of the true and bulk densities of the fine aggregate. The true density was determined using the Le Chatelier device. The bulk density of materials was determined using the methodology established by GOST 9758. **Results and discussion.** It was revealed that the presence of a nanomodifying additive in the composition, with a dispersion of S_{ud} = 0.69 m²/g and S_{ud} = 1.03 m²/g, increases the strength of the compositions compared with the control ones (without additives) from 7% to 17.8%, respectively. That is, there is an inverse relationship between the dispersion of the introduced additive and the change in the strength of the samples. The high dispersion value of the introduced additive ensures optimal conditions for the hardening of compounds, which is confirmed by studies on the water absorption of compounds. During the research, the influence of the amount of the studied additive on the setting time of cement, changes in the normal density of cement dough and porosity of cement systems were evaluated. In order to reduce cement consumption and increase the mobility of the mixture composition, a fine filler is introduced – sand with a mixed grain composition. In the process of selecting the composition of the concrete mix for 3D printing of small architectural forms, their technological properties were taken into account. Four compositions of a concrete mix for 3D printing with different amounts of nanostructuring additive, sand, and cement were studied. **Conclusion.** Compositions with optimal characteristics have been identified for further research in the field of selection and development of concrete mixtures for 3D printing of small architectural forms.

KEYWORDS: 3D printing, composition, concrete mix, nanostructuring additive, mobility, shrinkage, strength

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out with the financial support of the Russian Academy of Sciences within the framework of scientific project No. 23-79-01047 "Optimization of additive technology for the production of small architectural forms".

FOR CITATION:
Zhegera K.V., Dasaeva N.A. Development of a concrete mixture composition utilizing a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms. *Nanotechnologies in construction.* 2025;17(1):14–22. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22. – EDN: SUJOEH.

© Zhegera K.V., Dasaeva N.A., 2025

INTRODUCTION

In recent years, additive technologies have become an important tool in construction, including the creation of small architectural forms, opening up new horizons for design and implementation [1–9]. To create small architectural forms, building mixes are used on various types of binder, but products made with cement binder are considered the most durable and durable. Construction 3D printing using concrete mixes allows you to create complex and unique objects, not limited to traditional methods. This approach not only reduces construction time, but also significantly reduces material costs.

The development of compositions for concrete mixtures used in construction 3D printing is an exciting and promising area of modern construction technologies. Depending on the requirements of the project, the concrete composition must provide the necessary mechanical properties, solidification rate and resistance to external influences.

The key role is played by the choice of binders, additives and fillers, which affect the fluidity of the mixture and its adhesion to the 3D printer. An important aspect is the optimization of the formulation to ensure the uniformity and stability of the material flow, which is critical for the output layers of the structure.

Currently, many studies are focused on the creation of modifying additives that improve the characteristics of building mixes, as well as on the development of optimal formulations for 3D printing used in construction. In this regard, the process of selecting components for a building mix designed for 3D printing of small architectural objects is relevant [10–22].

METHODS AND MATERIALS

The following materials were used in the research:
- nanostructuring additive;
- additive-free Portland cement 52.5N;
- complex concrete additive Sika Antifreeze N9;
- the sand of the Ukhta deposit;
- sand of the Chapaevsky deposit;
- Axton superplasticizer;
- superplasticizer C-3.

The nanostructuring additive was obtained from an aluminosilicate precipitate, which is dried and ground to a powder with the required specific surface area [23].

The specific surface area of bulk materials was measured using the PSX-9 device [24].

To determine the water retention capacity, an installation consisting of a glass plate with a thickness of 5mm and a size of (150×150) mm; blotting paper with a size of (150×150) mm; a metal ring with a wall thickness of 5 mm, a height of 12 mm and a diameter of 100 mm and a gauze cloth gasket (250×350) mm was used [25]. The calculation was carried out according to the formula:

$$V = \left(100 - \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3} \cdot 100\right), \quad (1)$$

where m_1 – the weight of the blotting paper size (150×150) mm before testing, g;

m_2 – the weight of the blotting paper after the test, g;

m_3 – installation weight without mortar mixture, g;

m_4 – the mass of the installation with a mortar mixture, g.

The kinetics of water absorption of the composition was determined by the method specified in GOST 5802 [25]. To do this, the samples were pre-dried to a constant mass and placed in a vessel filled with water t = (20 ± 2) °C. The mass of the samples was measured on a scale every hour, the results were recorded with an accuracy of ±0.1%. The tests continued until the difference between two consecutive weighings did not exceed 0.1%.

Water absorption by weight (Wm) as a percentage was determined using the formula:

$$W_m = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100, \quad (2)$$

where m_d – mass of the dried sample, g;

m_w – mass of the water–saturated sample, g.

The compressive strength of the samples (MPa) was determined in accordance with GOST 5802 [25]. To determine the strength, samples with a size of 100×100×100 mm and an IR 5057-50 testing machine were used. The load rate on the test sample was set to 10 mm/min. Calculations were carried out according to the formula:

$$R_c = P/F, \quad (3)$$

where P – destructive load, N;

F – sample surface area, m^2.

Capillary (P_{cap}), contractional (P_{con}) and gel (P_{gel}) porosities of the compositions were calculated as a percentage in accordance with the methodology [26] and formulas:

$$\mathrm{P}_{cap} = \frac{W/C - 0{,}5 \cdot \delta}{W/C + 0{,}32} \cdot 100, \quad (4)$$

$$\mathrm{P}_{con} = \frac{0{,}09 \cdot \delta}{W/C + 0{,}32} \cdot 100, \quad (5)$$

$$\mathrm{P}_{gel} = \frac{0{,}2 \cdot \delta}{W/C + 0{,}32} \cdot 100, \quad (6)$$

where W/C – water-cement ratio;

The hydration of cement (α) was calculated from the value of chemically bound water (Wn) in the studied samples [26]:

$$\alpha = 4 \cdot W_n. \quad (7)$$

The open porosity (P_o), taking into account the natural volume of the material (V_n, m^3), was calculated using the formula [26]:

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{V_n} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 100\%, \quad (8)$$

where m_s and m_d is the mass of the material in a saturated state and mass of the material in a dry state, kg.

The total porosity (P_g) as a percentage was calculated using the formula [26]:

$$P_g = \frac{W/C - 0{,}21 \cdot б}{W/C + 0{,}32} \cdot 100, \quad (9)$$

The change in the normal density and setting time of the cement dough was determined using the Vika device [27]. The test solution was placed in the bowl, leveled, then the pestle of the Vika device was brought into contact with the solution, the initial value on the scale of the device was fixed and the locking mechanism was removed. After 5 minutes, the final value was measured on the scale of the device. The difference between the initial and final values, equal to (5–7) mm, was considered the normal density of the solution.

The change in the setting time of the composition was measured by the Vika device using a needle. The solution was placed in the bowl of the device and evenly distributed. The needle of the device was brought to the surface of the solution and the locking mechanism was released. The beginning of the setting process was considered to be the moment when the needle did not reach the bottom of the bowl by 1–2 mm, and the end was the moment when the needle did not go deeper into the solution by more than 1–2 mm.

The intergranular voidness of a fine filler in an uncompacted state ($V_{i.v.}$) was calculated [28]:

$$V_{i.v.} = \left(1 - \frac{c_b}{c_t}\right) \cdot 100\%, \quad (10)$$

where ρ_b and ρ_t – bulk density and true density of the material, g/cm^3.

The true density (c_t) was determined using the Le Chatelier device [29] and the formula:

$$c_t = (m_1 - m_2)/V, \quad (11)$$

where V – volume of the poured powder, cm^3;
m_1 is the initial mass of the powder with a cup, g;
m_2 – mass of the remaining powder with a cup, g;

The bulk density (c_b) was determined according to GOST 9758 [30] using the formula:

$$c_b = m/V, \quad (12)$$

where m is the mass of the material, g;
V – volume of the vessel, cm^3.

RESULTS AND DISCUSSIONS

To optimize the composition of the concrete mix for a 3D printer, it is necessary to investigate the effect of each component on the system and determine its optimal content in the formulation.

In order to identify the optimal size of the specific surface of the additive for its use in the composition of the concrete mixture, an assessment of the hardening change was carried out (Fig. 1) and water absorption (Fig. 2) of a cement composite using a synthesized additive of different dispersion in the formulation.

The analysis of Fig. 1 showed that the value of the specific surface of the nanostructuring additive has an effect on the structure formation of cement compositions. It was revealed that a nanostructuring additive with a surface of S_{ud} = 1.03 m^2/g and S_{ud} = 0.69 m^2/g in the studied compositions favorably affects an increase in compressive strength by 7% and 17.8%, but an increase in the specific surface of the additive leads to a decrease in strength by 35% and 31% compared with the additive-free composition. Thus, a nanomodifying additive with a high dispersion value contributes to the creation of favorable conditions for the strength gain of the composition using cement.

Analysis of the data presented in Fig. 2 showed that samples with an additive with a specific surface area of S_{ud} = 0.69 m^2/g, compared with samples with S_{ud} = 0.1 m^2/g, have 9.6% lower water absorption. That is, it is possible to identify a pattern that the higher the dispersion value of the additive, the lower the water absorption of the studied compositions.

Thus, for subsequent tests, the optimal surface size of the nanostructuring additive is S_{ud} = 1.03 m^2/g.

The results of the effect of the amount of nanostructuring additive, depending on the mass of cement in the cement system, on the setting time and the normal density of the cement dough are shown in Table 1.

It was found that the compositions in the presence of a nanostructuring additive have a higher value of the normal density of the cement paste and a shorter setting time. At the same time, an increase in the percentage of the nanomodifying additive in the cement binder accelerates the setting time of the compositions.

Also, there is a decrease in capillary porosity by 11–52% and total porosity by 2–10%, an increase in gel porosity by 5–23% and contractional porosity by 4–23% compared with the control sample (without additives). Thus, it can be said that the introduction of a nanostructuring additive helps to increase the durability of the composition using cement.

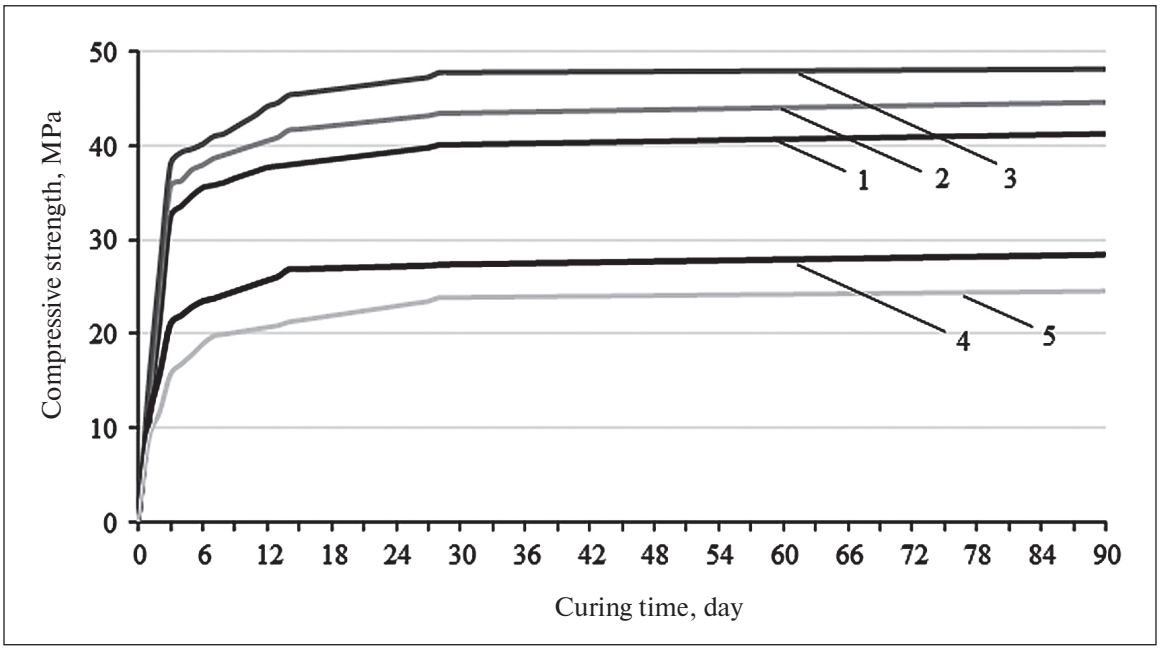


Fig. 1. Strength set of compounds with a nanostructuring additive: 1 – sample without additive (control); 2 – specific surface area of the additive S_{sp} = 1.03 m²/g; 3 – S_{sp} = 0.69 m²/g; 4 – S_{sp} = 0.31 m²/g; 5 – S_{sp} = 0.1 m²/g

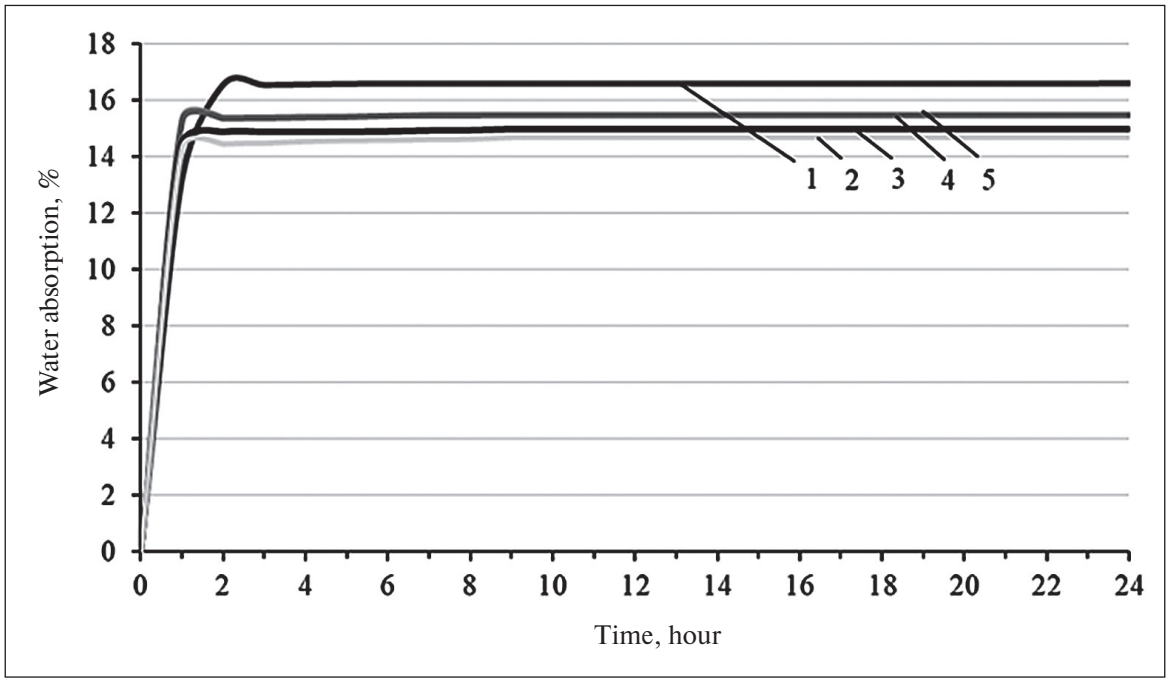


Fig. 2. Changing the water absorption of compounds: 1 – control sample; 2 – nanomodifying additive with specific surface area S_{sp} = 1.03 m²/g; 3 – nanomodifying additive with S_{sp} = 0.69 m²/g; 4 – nanomodifying additive with S_{sp} = 0.31 m²/g; 5 – nanomodifying additive with S_{sp} = 0.1 m²/g

In order to reduce cement consumption and increase the mobility of the mixture, a fine filler sand is introduced. Sand with the lowest intergranular voidness should be used in the composition being developed. In this regard, sands with a mixed grain composition were studied (Table 2). Table 2 shows the granulometric compositions of the sands of the Ukhtinsky and Chaadaevsky deposits.

Thus, the analysis of the data in Table 2–3 showed that for further development of the composition of the

Table 1. The change in the properties of the composition from the percentage of the nanostructuring additive

	The amount of nanomodified additive			
	–	10%	20%	30%
The normal density of the cement paste, %	28	34	41	43
Setting time	Beginning 2 h 30min End of 5 h	Beginning 50 min End 1 h 40 min	Beginning 40 min End 1 h 30 min	Beginning 20 min End 1 h 15 min
Total porosity, %	41.1	40.3	38.3	36.9
Capillary porosity, %	18.7	16.7	12	9
Gel porosity, %	15.5	16.3	18.1	19.5
Contractional porosity, %	7.0	7.3	8.2	8.8

Table 2. Granulometric composition of fine aggregate

The content of fractions, %	Sand fraction, mm					
	More 2.5	2.5–1.25	1.25–0.63	0.63–0.315	0.315–0.16	Less 0.16
The sand of the Ukhta deposit	1.0	2.1	9.8	39.5	44.0	3.8
Sand of the Chapaevsky deposit	–	0.3	12.1	58.1	26.6	2.9

Table 3. Density and intergranular voidness of fine filler

Fraction size, mm	Chaadaevsky sand		Ukhtinsky sand	
	Bulk density, kg/m³	Intergranular voidness, %	Bulk density, kg/m³	Intergranular voidness, %
0.315–0.16	1418.2	46.5	1460.1	44.9
0.63–0.315	1529.9	42.3	1522.3	42.6
1.25–0.63	1599.3	39.6	1530.3	42.3

3D construction mixture, sand from the Ukhtinskoye deposit should be used.

To find the optimal ratio between the three main sand fractions (0.16–0.315mm; 0.315–0.63mm; 0.63–1.25mm), the value of the bulk density of fine aggregate was estimated using the method of mathematical description of physical adsorption (Table 4).

It has been found that the use of sand with a fraction ratio of 0.63–0.315:0.315–0.16 (mm) of 80% to 20% leads to an increase in the value of the coefficient of angularity (K_u), which contributes to the strong adhesion of sand particles to the cement matrix.

In the process of selecting the composition of the concrete mix for 3D printing of small architectural forms, their technological properties were taken into account. Four compositions of a concrete mix for 3D printing with different amounts of nanostructuring additive, sand, and cement were studied. Table 5 shows the basic requirements for mixtures and the results of the tests performed.

Thus, in the course of the conducted research, it was found that despite the mobility of compositions 3 and 4 cannot be used in 3D printing technology of small architectural forms, since the long-term setting speed of the mixture does not make it possible to apply the mixture in layers. Therefore, formulations 1 and 2 will be used for further research. In the future, a plasticizer will be introduced into the composition to increase the mobility of the mixture.

CONCLUSION

As a result of the study, it was found that the addition of a nanostructuring additive to cement compositions increases their density, shortens the setting time and reduces capillary porosity. To optimize the composition

Table 4. The coefficient of angularity for the Ukhta sand deposit

Name of the material	S_f according to the BET method, m²/kg	S_m, m²/kg	K_u
Sand without sifting	800	776.35	1.03
Sand fractions of 0.16 – 0.315; 0.315 – 0.63; 0.63 – 1.25 (mm) in a ratio of 70%:20%:10%	789	750.4	1.05
Sand fractions 0.63–0.315:0.315–0.16 (mm) in a ratio of 70%:30%	756	652.3	1.09
Sand fractions 0.63–0.315:0.315–0.16 (mm) in a ratio of 75%:25%	720	621.7	1.12
Sand fractions 0,63–0,315:0,315–0,16 (mm) in the ratio 80%:20%	700	582.39	1.20

Table 5. Technical requirements for a concrete mix solution for 3D printing

Requirements	The value of the indicator	Composition 1	Composition 2	Composition 3	Composition 4
Mobility, mm	no more 7	4.4	3.8	6.7	5.4
Delamination, %	no more 10	2.5	1.9	7.8	8.8
Water retention capacity	no less 97	97.72	98.86	96.92	9.25
Plastic strength, Pa	no less 80	81.3	86.9	31.1	75.8
Setting speed of the mixture, min	no more 20 min after extrusion	Beginning 12 min, end – 30 min	Beginning 15 min, end – 20 min	Beginning 20 min, end – 67 min	Beginning 45 min, end – 90 min

of the 3D construction mix, it is recommended to use sand from the Ukhtinskoye deposit with a fraction ratio of 0.63–0.315:0.315–0.16 (mm) 80%:20%, which provides better mobility and adhesion to cement. Formulations with long setting times are not suitable for 3D construction printing, so further research will be aimed at reducing the setting time of the formulations and increasing their mobility.

REFERENCES

1. Torshin A.O., Borovikova S.O., Korchunov I.V., Potapova E.N. Development of construction mix for 3D printing. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018;32(2):164-166.

2. Suvash Ch.P., Yi Wei D.T., Biranchi P., Ming J.T. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;311-319.

3. Elistratkin M.Yu., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Glagolev E.S. On the development of building printing technologies. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2018;5:11-19.

4. Mukhametrakhimov R.H., Ziganshina L.V. Technology and quality control of construction 3D printing. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022;1(59):64-79.

5. Korolev E.V., Zuong T.K., Inozemtsev A.S. A method for providing internal care for cement hydration in 3D printing formulations. *Bulletin of the MGSU*. 2020;6(15)6:834-846. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.834-846

6. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Rheological behavior of dispersed systems for construction 3D printing: a control problem based on the capabilities of the Nano arsenal. *Nanotechnologies in construction*. 2018;3(10):107-122. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122

7. Myradov R., Guldzhanova D., Nazarlieva O. 3D printing in construction: a revolution in construction technologies. *Bulletin of Science*. 2024;3-9(78):464-467.

8. Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y., Podgorny D.S., Al Mamuri Saad Khalil Shadid. Composite binders for 3D additive technologies. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2021;18-4 (80):428-439.

9. Mukhametrakhimov R.H., Ziganshina L.V. Improving the technology of additive construction production by regulating the duration of breaks in the 3D printing process. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024;4(112):21.

10. Bondarev B.A., Bayazov V.A., Korneev O.O., Vostrikov I.A., Meshcheryakov A.A., Korneeva A.O. Selection of mixtures for 3D printing. *Bulletin of Eurasian Science*. 2021;13(3):25.

11. Zhegera K.V., Lavrov I.Yu., Troshchev D.V. Optimization of the synthesis of a nanostructuring additive for use in the working mixture of a 3D printer. *Regional architecture and construction*. 2024;2(59):60-65. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_60

12. Patent CN 105753404A, B33Y70/00. *Cement-based material used for building 3D (three-dimensional) printing, claimed*. 13.02.2016, publ. 13.07.2016.

13. Lavrov, I.Y., Zhegera, K.V., Troshchev, D.V. Designing a Construction 3-D Printer and Choosing a Kinematic Scheme for Moving the Printhead. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_2

14. Patent CN 108715531A, C04B28/02. *A kind of high thixotropic 3D printing concrete and preparation method therefor, claimed*. 06.12.2018, publ. 08.28.2020.

15. Trebukhin A.F., Parry D.E. Modern three-dimensional printers for additive construction production. *Engineering Bulletin of the Don*. 2019;8(59):8.

16. Yemelyanov R.T., Prokopyev A.P., Yakshina A.A., Pindur S.V. Modeling of 3D printing of small architectural forms. *Bulletin of Eurasian Science*. 2020;12(2):8.

17. Patent RU 2729086, C04B 28/04. *Two-phase cement-based mixture for composites in construction 3D printing technology, claimed*. 21.10.2019, publ. 04.08.2020.

18. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Composite binders for fiber-reinforced concrete used for 3-D printing. *System technologies*. 2019;1(30):47-51.

19. Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A. The effect of the addition of thermomodified peat on the technological properties of building mixes for 3D printing. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018;20(4):122-134.

20. Baykhodzhaeva Zh.I., Estemesova A.S. Fine-grained concrete for 3D (additive) printing. *Endless light in science*. 2024;2:416-420.

21. Beznogova O.Yu., Potapova E.N. Materials for additive construction production. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2022;36(3)-(252):16-18.

22. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Babenko D.S., Shvedova M.A. Investigation of the effect of modifying additives on the structure formation and hardening of cement composites for 3D printing. *Condensed media and interphase boundaries*. 2023;25(1):112-124.

23. Zhegera K.V., Ryzhov A.D., Sokolova Yu.A., Shestakov N.I. Patterns of structure formation of calcareous composites with an additive based on amorphous aluminosilicates. *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(3):220–227. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-220-227

24. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R. Pozzolanic activity of expanded clay dust and its dependence on specific surface area. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013;3(25):98-104.

25. *Electronic Fund of legal and regulatory documents* [Electronic resource]. https://docs.cntd.ru/document/901710699 (11.15.2024).

26. Zhegera K.V. *Development of an adhesive dry building mix using an additive based on amorphous aluminosilicates: dissertation* ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.05 Penza 2016. [Electronic resource]. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01008558930 (11/15/2024).

27. *Electronic fund of legal and regulatory documents* [Electronic resource]. https://docs.cntd.ru/document/871001226 (11.15.2024).

28. *Electronic Fund of legal and regulatory and technical documents* [Electronic resource]. https://docs.cntd.ru/document/1200003348 (11.15.2024).

29. *Electronic Fund of legal and regulatory documents* [Electronic resource]. https://docs.cntd.ru/document/1200113456 (accessed: 11.15.2024).

30. *Electronic Fund of legal and regulatory documents* [Electronic resource]. https://docs.cntd.ru/document/1200100905 (11.15.2024).

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kristina V. Zhegera – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor, Department of the Quality Management, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, jegera@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8539-9687

Natalia A. Dasaeva – Research assistant in the research sector, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, dasaeva_na@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0000-9444-9404

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Kristina V. Zhegera – scientific guidance, collection, analysis and processing of results, writing an article.

Natalia A. Dasaeva – sample preparation, testing**.**

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 03.12.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.02.2025.

Научная статья / Original article
УДК 691.534
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22

CC BY 4.0

Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм

Кристина Владимировна Жегера* , **Наталья Андреевна Дасаева**
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: jegera@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время аддитивные технологии широко используются в различных сферах деятельности. Использование таких технологий в строительстве помогает решить ряд очень важных вопросов. При 3D печати для изготовления малых архитектурных форм очень важно правильно подобрать составы материалов, из которых они будут изготавливаться. **Материалы и методы.** Для разработки состава в качестве наномодифицирующей добавки применялись синтезированные алюмосиликаты, в качестве вяжущего – портландцемент бездобавочный 52,5Н, мелкий заполнитель – песок кварцевый Ухтинского и Чаадаевского месторождения, комплексная добавка Sika Antifreeze N9, суперпластификатор Axton, суперпластификатор С-3. Водоудерживающую способность составов с применением наномодифицирующей добавки определяли по количеству воды в исследуемом составе до и после проведения испытаний. Кинетика водопоглощения составов определялась в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 5802. Пористость определялась по содержанию свободной и химически связанной воды в цементном камне. Изменение нормальной густоты и сроков схватывания определялось с использованием прибора Вика. Межзерновая пустотность песка вычислялась по значениям истинной и насыпной плотностей мелкого заполнителя. Истинная плотность определялась с помощью прибора Ле-Шателье. Насыпная плотность материалов определялась с помощью методики, установленной ГОСТ 9758. **Результаты и обсуждения.** Выявлено, что присутствие в составе наномодифицирующей добавки дисперсностью $S_{уд}$ = 0,69 м^2/г и $S_{уд}$ = 1,03 м^2/г повышает прочность составов по сравнению с контрольными (без добавки) от 7% до 17,8% соответственно. То есть наблюдается обратная зависимость между дисперсностью вводимой добавки и изменением прочности образцов. Высокое значение дисперсности вводимой добавки обеспечивает оптимальные для твердения составов условия, что подтверждается исследованиями по водопоглощению составов. В ходе исследований оценивалось влияние количества исследуемой добавки на сроки схватывания цемента, изменение

нормальной густоты цементного теста и пористости цементных систем. С целью снижения расхода цемента и увеличения подвижности состава смеси вводится мелкий заполнитель – песок со смешанным зерновым составом. В процессе подбора состава бетонной смеси для 3D-печати малых архитектурных форм учитывались их технологические свойства. Исследовались четыре состава бетонной смеси для 3D-печати с разным количеством содержания наноструктурирующей добавки, песка, цемента. **Выводы.** Определены составы с оптимальными характеристиками для проведения дальнейших исследований в области подбора разработки составов бетонных смесей для 3D-печати малых архитектурных форм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-печать, состав, бетонная смесь, наноструктурирующая добавка, подвижность, усадка, прочность

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-79-01047 «Оптимизация аддитивной технологии для производства малых архитектурных форм».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Жегера К.В., Дасаева Н.А. Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):14–22. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22. – EDN: SUJOEH.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья / Original article
УДК 691.534
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22

CC BY 4.0

Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм

Кристина Владимировна Жегера*, Наталья Андреевна Дасаева
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: jegera@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время аддитивные технологии широко используются в различных сферах деятельности. Использование таких технологий в строительстве помогает решить ряд очень важных вопросов. При 3D печати для изготовления малых архитектурных форм очень важно правильно подобрать составы материалов, из которых они будут изготавливаться. **Материалы и методы.** Для разработки состава в качестве наномодифицирующей добавки применялись синтезированные алюмосиликаты, в качестве вяжущего – портландцемент бездобавочный 52,5Н, мелкий заполнитель – песок кварцевый Ухтинского и Чаадаевского месторождения, комплексная добавка Sika Antifreeze N9, суперпластификатор Axton, суперпластификатор С-3. Водоудерживающую способность составов с применением наномодифицирующей добавки определяли по количеству воды в исследуемом составе до и после проведения испытаний. Кинетика водопоглощения составов определялась в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 5802. Пористость определялась по содержанию свободной и химически связанной воды в цементном камне. Изменение нормальной густоты и сроков схватывания определялось с использованием прибора Вика. Межзерновая пустотность песка вычислялась по значениям истинной и насыпной плотностей мелкого заполнителя. Истинная плотность определялась с помощью прибора Ле-Шателье. Насыпная плотность материалов определялась с помощью методики, установленной ГОСТ 9758. **Результаты и обсуждения.** Выявлено, что присутствие в составе наномодифицирующей добавки дисперсностью $S_{уд}$ = 0,69 м^2/г и $S_{уд}$ = 1,03 м^2/г повышает прочность составов по сравнению с контрольными (без добавки) от 7% до 17,8% соответственно. То есть наблюдается обратная зависимость между дисперсностью вводимой добавки и изменением прочности образцов. Высокое значение дисперсности вводимой добавки обеспечивает оптимальные для твердения составов условия, что подтверждается исследованиями по водопоглощению составов. В ходе исследований оценивалось влияние количества исследуемой добавки на сроки схватывания цемента, изменение нормальной густоты цементного теста и пористости цементных систем. С целью снижения расхода цемента и увеличения подвижности состава смеси вводится мелкий заполнитель – песок со смешанным зерновым составом. В процессе подбора состава бетонной смеси для 3D-печати малых архитектурных форм учитывались их технологические свойства. Исследовались четыре состава бетонной смеси для 3D-печати с разным количеством содержания наноструктурирующей добавки, песка, цемента. **Выводы.** Определены составы с оптимальными характеристиками для проведения дальнейших исследований в области подбора разработки составов бетонных смесей для 3D-печати малых архитектурных форм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-печать, состав, бетонная смесь, наноструктурирующая добавка, подвижность, усадка, прочность

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-79-01047 «Оптимизация аддитивной технологии для производства малых архитектурных форм».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Жегера К.В., Дасаева Н.А. Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3D-печати малых архитектурных форм. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(1):14–22. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22. – EDN: SUJOEH.

© Жегера К.В., Дасаева Н.А., 2025

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Development of the composition of a concrete mixture using a nanostructuring additive for 3d printing of small architectural forms

Kristina V. Zhegera*, **Natalia A. Dasaeva**
Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
* Corresponding author: e-mail: jegera@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, additive technologies are widely used in various fields of activity. The use of such technologies in construction helps to solve a number of very important issues. When 3D printing for the manufacture of small architectural forms, it is very important to choose the right composition of the materials from which they will be made. **Materials and methods.** To develop the composition, synthesized aluminosilicates were used as a nanomodifying additive, Portland cement without additives 52.5N was used as a binder, fine filler quartz sand from the Ukhtinsky and Chaadaevsky deposits, complex additive Sika Antifreeze N9, superplasticizer Axton, superplasticizer C-3. The water retention capacity of formulations using a nanomodifying additive was determined by the amount of water in the test composition before and after the tests. The kinetics of water absorption of the compositions was determined in accordance with the methodology presented in GOST 5802. Porosity was determined by the content of free and chemically bound water in the cement stone. The change in the normal density and setting time was determined using the Vic device. The intergranular voidness of the sand was calculated from the values of the true and bulk densities of the fine aggregate. The true density was determined using the Le Chatelier device. The bulk density of materials was determined using the methodology established by GOST 9758. **Results and discussions.** It was revealed that the presence of a nanomodifying additive in the composition, with a dispersion of Sud = 0.69 m^2/g and Sud = 1.03 m^2/g, increases the strength of the compositions compared with the control ones (without additives) from 7% to 17.8%, respectively. That is, there is an inverse relationship between the dispersion of the introduced additive and the change in the strength of the samples. The high dispersion value of the introduced additive ensures optimal conditions for the hardening of compounds, which is confirmed by studies on the water absorption of compounds. During the research, the influence of the amount of the studied additive on the setting time of cement, changes in the normal density of cement dough and porosity of cement systems were evaluated. In order to reduce cement consumption and increase the mobility of the mixture composition, a fine filler is introduced – sand with a mixed grain composition. In the process of selecting the composition of the concrete mix for 3D printing of small architectural forms, their technological properties were taken into account. Four compositions of a concrete mix for 3D printing with different amounts of nanostructuring additive, sand, and cement were studied. **Conclusions.** Compositions with optimal characteristics have been identified for further research in the field of selection and development of concrete mixtures for 3D printing of small architectural forms.

KEYWORDS: 3D printing, composition, concrete mix, nanostructuring additive, mobility, shrinkage, strength

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out with the financial support of the Russian Academy of Sciences within the framework of scientific project No. 23-79-01047 "Optimization of additive technology for the production of small architectural forms".

FOR CITATION:
Zhegera K.V., Dasaeva N.A. Development of a concrete mixture composition utilizing a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms. *Nanotechnologies in construction.* 2025;17(1):14–22. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-14-22. – EDN: SUJOEH.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы аддитивные технологии стали важным инструментом в строительстве, в том числе при создании малых архитектурных форм, открывая новые горизонты для проектирования и реализации [1-9]. Для создания малых архитектурных форм применяют строительные смеси на различных видах вяжущего, но наиболее прочными и долговечными считаются изделия, изготовленные на цементном вяжущем. Строительная 3D-печать с помощью бетонных смесей позволяет создавать сложные и уникальные объекты, не ограничиваясь традиционными методами. Этот подход не только сокращает время строительства, но и значительно снижает материальные затраты.

Разработка составов для бетонных смесей, применяемых в строительной 3D печати, представляет собой увлекательную и перспективную область современных строительных технологий. В зависимо-

сти от требований проекта, состав бетона должен обеспечивать необходимые механические свойства, скорость затвердевания и устойчивость к внешним воздействиям.

Ключевую роль играет выбор вяжущих компонентов, добавок и заполнителей, которые влияют на текучесть смеси и её адгезию к 3D-принтеру. Важным аспектом является оптимизация рецептуры, чтобы обеспечить равномерность и стабильность потока материала, что критично для выводимых слоев конструкции.

В настоящее время многие исследования сосредоточены на создании модифицирующих добавок, которые улучшают характеристики строительных смесей, а также на разработке оптимальных составов для 3D-печати, применяемой в строительстве. В связи с этим актуальным является процесс подбора компонентов для строительной смеси, предназначенной для 3D-печати небольших архитектурных объектов [10–22].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При проведении исследований применялись следующие материалы:

- наноструктурирующая добавка;
- бездобавочный портландцемент 52,5Н;
- добавка для бетона комплексная Sika Antifreeze N9;
- песок Ухтинского месторождения;
- песок Чаадаевского месторождения;
- суперпластификатор Axton;
- суперпластификатор С-3.

Наноструктурирующая добавка получалась из алюмосиликатного осадка, который высушивался и измельчался до порошка с необходимой удельной поверхностью [23].

Измерение удельной поверхности сыпучих материалов проводилось с помощью прибора ПСХ-9 [24].

Для определения водоудерживающей способности применялась установка, состоящая из пластинки стеклянной толщиной 5 мм и размером (150×150) мм; промокательной бумаги размером (150×150) мм; металлического кольца с толщиной стенки 5 мм, высотой 12 мм и диаметром 100 мм и прокладки из марлевой ткани (250×350) мм [25]. Расчет проводился по формуле:

$$V = \left(100 - \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3} \cdot 100\right), \quad (1)$$

где m_1 – масса промокательной бумаги размером (150×150) мм до испытаний, г;

m_2 – масса промокательной бумаги после испытания, г;

m_3 – масса установки без растворной смеси, г;

m_4 – масса установки с растворной смесью, г.

Кинетика водопоглощения состава определялась по методике, указанной в ГОСТ 5802 [25]. Для этого образцы предварительно высушивались до постоянной массы и помещались в сосуд, наполненный водой t = (20±2) °С. Измерение массы образцов производилось на весах каждый час, результаты фиксировались с точностью ±0,1%. Испытания продолжались до момента, пока разница между двумя последовательными взвешиваниями не превышала 0,1%.

Водопоглощение по массе (W_m) в процентах определялось по формуле:

$$W_m = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $m_{сух}$ – масса высушенного образца, г;

$m_{вл}$ – масса водонасыщенного образца, г.

Прочность образцов на сжатие (МПа) определялась в соответствии с ГОСТ 5802 [25]. Для определения прочности применялись образцы размером 100×100×100 мм и испытательная машина «ИР 5057-50». Скорость нагрузки на испытуемый образец устанавливалась 10 мм/мин. Расчеты проводились по формуле:

$$R_{сж} = P/F, \quad (3)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

F – площадь поверхности образца, м^2.

Капилярная ($П_{кап}$), контракционная ($П_{кон}$) и гелевая ($П_{гел}$) пористости составов рассчитывались в процентах в соответствии с методикой [26] и формулам:

$$П_{кап} = \frac{В/Ц - 0{,}5 \cdot б}{В/Ц + 0{,}32} \cdot 100, \quad (4)$$

$$П_{кон} = \frac{0{,}09 \cdot б}{В/Ц + 0{,}32} \cdot 100, \quad (5)$$

$$П_{гел} = \frac{0{,}2 \cdot б}{В/Ц + 0{,}32} \cdot 100, \quad (6)$$

где $В/Ц$ – водоцементное соотношение.

Гидратация цемента (α) вычислялась по значению связанной химически воды (W_n) в исследуемых образцах [26]:

$$\alpha = 4 \cdot W_n. \quad (7)$$

Открытую пористость ($П_{отк}$) с учетом естественного объема материала ($V_{ест}$, м^3) рассчитывали по формуле [26]:

$$П_{отк} = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{V_{ест}} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $m_{нас}$ и $m_{нас}$ – масса образца в насыщенном и сухом состоянии соответственно, кг.

Общую пористость ($П_{общ}$) в процентах рассчитывали по формуле [26]:

$$П_{общ} = \frac{В/Ц - 0{,}21 \cdot б}{В/Ц + 0{,}32} \cdot 100. \quad (9)$$

Изменение нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста определялось с помощью прибора Вика [27]. В чашу помещался испытуемый раствор, разравнивался, затем пестик прибора Вика доводился до соприкосновения с раствором, фиксировалось начальное значение по шкале устройства и снимался стопорящий механизм. Через 5 мин измерялось конечное значение по шкале прибора. Нормальной густотой раствора считалась разность между начальным и конечным значениями, равная 5–7 мм.

Изменение сроков схватывания состава измерялось прибором Вика при помощи иглы. Раствор помещался в чашу устройства и равномерно распределялся. Игла прибора подводилась к поверхности раствора, и отпускался стопорный механизм. Началом процесса схватывания считался момент, когда игла не доходила до дна чаши на 1–2 мм, а окончанием – момент, когда игла не углублялась в раствор более чем на 1–2 мм.

Межзерновая пустотность мелкого заполнителя в неуплотненном состоянии ($V_{м.п.}$) вычислялась [28]:

$$V_{м.п.} = \left(1 - \frac{c_{нас}}{c_{ист}}\right) \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $\rho_{нас}$ и $\rho_{ист}$ – насыпная и истинная плотность материала, г/см^3;

Истинная плотность ($\rho_{ист}$) определялась по прибору Ле-Шателье [29] и формуле:

$$c_{ист} = (m_1 - m_2)/V, \quad (11)$$

где V – объем исследуемого материала, см^3;

m_1 – масса материала в стакане, г;

m_2 – масса стакана с оставшимся материалом, г.

Насыпная плотность ($\rho_{нас}$) определялась по ГОСТ 9758 [30] с помощью формулы:

$$c_{нас} = m/V, \quad (12)$$

где m – масса исследуемого материала, г;

V – объем сосуда, см^3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оптимизации состава бетонной смеси для 3D принтера необходимо исследовать влияние каждого компонента на систему и определить оптимальное содержание его в рецептуре.

С целью выявления оптимального размера удельной поверхности добавки для применения ее в составе бетонной смеси проведена оценка изменения твердения (рис. 1) и водопоглощения (рис. 2) цементного композита с применением в рецептуре синтезируемой добавки разной дисперсности.

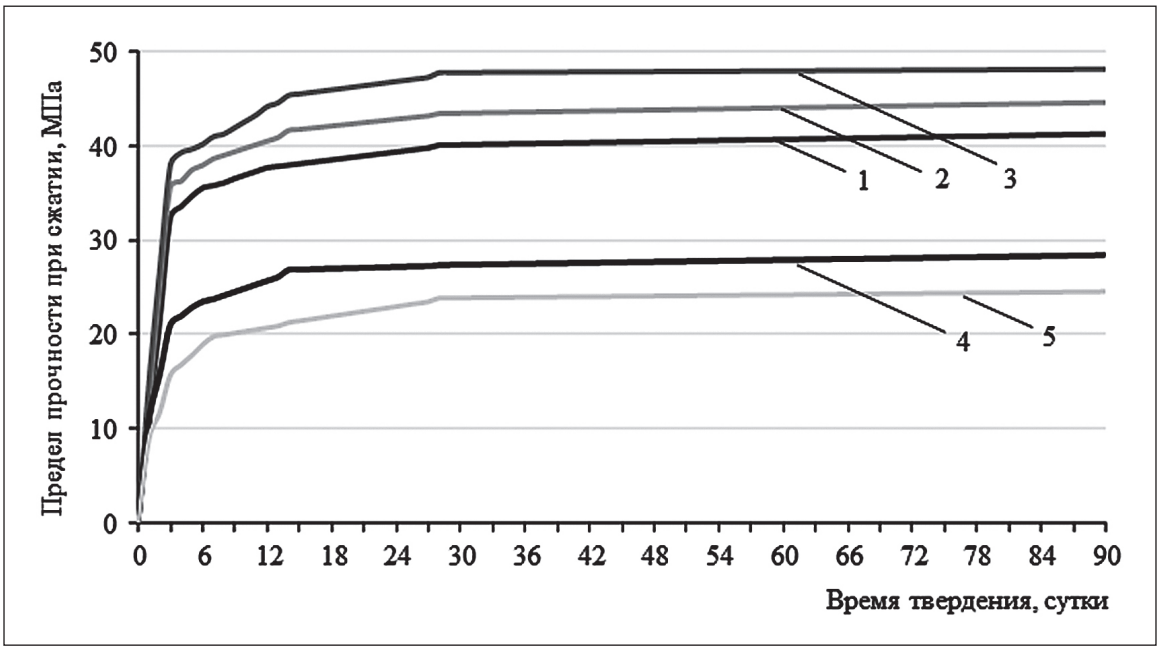


Рис. 1. Набор прочности составов с наноструктурирующей добавкой: 1 – образец без добавки (контрольный); 2 – удельная поверхность добавки $S_{уд}$ = 1,03 м^2/г; 3 –$S_{уд}$ = 0,69 м^2/г; 4 –$S_{уд}$ = 0,31 м^2/г; 5 –$S_{уд}$ = 0,1 м^2/г

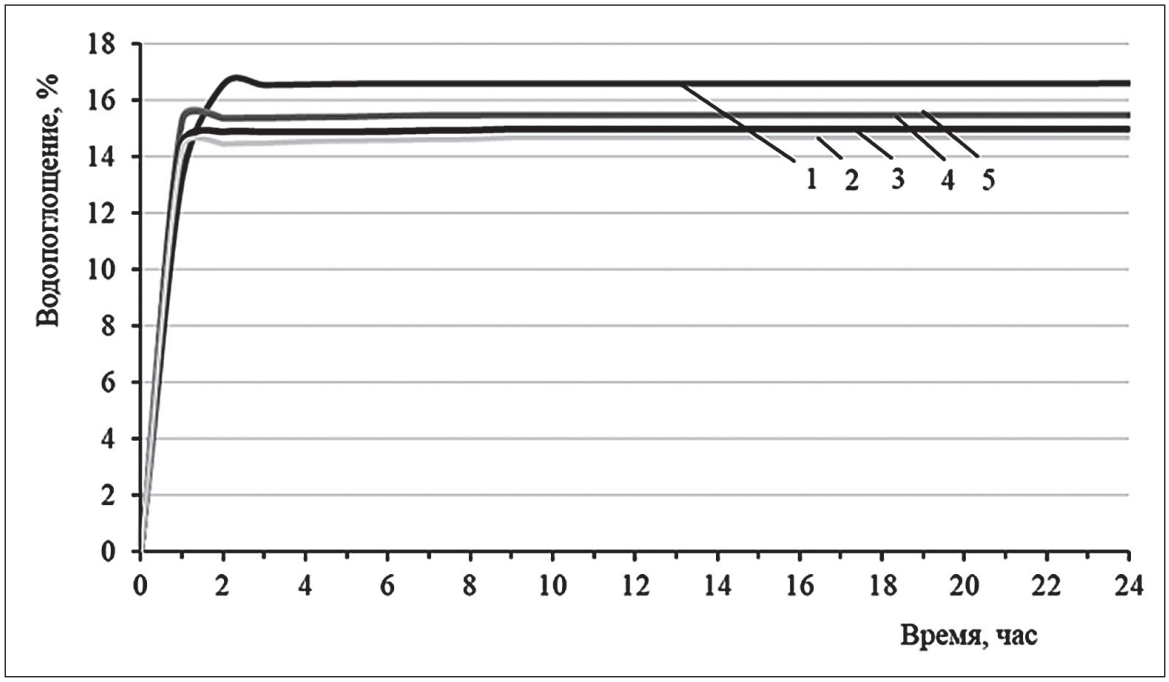


Рис. 2. Изменение водопоглощения составов: 1 – контрольный образец; 2 – наномодифицирующая добавка с удельной поверхностью $S_{уд}$ = 1,03 м²/г; 3 – наномодифицирующая добавка с $S_{уд}$ = 0,69 м²/г; 4 – наномодифицирующая добавка с $S_{уд}$ = 0,31 м²/г; 5 – наномодифицирующая добавка с $S_{уд}$ = 0,1 м²/г.

Анализ рис. 1 показал, что величина удельной поверхности наноструктурирующей добавки оказывает влияние на структурообразование цементных составов. Выявлено, наноструктурирующая добавка с поверхностью $S_{уд}$ = 1,03м²/г и $S_{уд}$ = 0,69м²/г в исследуемых составах благоприятно воздействует на увеличение прочности при сжатии на 7% и 17,8%, но увеличение удельной поверхности добавки приводит к снижению прочности на 35% и 31% по сравнению с бездобавочным составом. Таким образом, наномодифицирующая добавка с высоким значением дисперсности способствует созданию благоприятных условий для набора прочности состава с применением цемента.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что образцы с добавкой с удельной поверхностью $S_{уд}$ = 0,69 м²/г по сравнению с образцами с $S_{уд}$ = 0,1 м²/г на 9,6% обладают меньшим водопоглощением. То есть можно выявить закономерность, что чем больше значение дисперсности добавки, тем ниже водопоглощение исследуемых составов.

Таким образом, для проведения последующих испытаний оптимальный размер поверхности наноструктурирующей добавки составляет $S_{уд}$ = 1,03 м²/г.

Результаты влияния количества наноструктурирующей добавки в зависимости от массы цемента в цементной системе на время схватывания и нормальную густоту цементного теста приведены в табл. 1.

Установлено, что составы в присутствии наноструктурирующей добавки имеют более высокое значение нормальной густоты цементного теста и сокращение сроков схватывания. При этом увеличение процентного содержания наномодифицирующей добавки в цементном вяжущем ускоряет сроки схватывания составов.

Также наблюдается уменьшение капиллярной пористости на 11–52% и общей пористости на 2–10%, повышение гелевой пористости на 5–23% и контракционной пористости на 4–23% в сравнении с контрольным образцом (без добавки). Таким образом, можно сказать, что введение наноструктурирующей добавки способствует увеличению стойкости состава с применением цемента.

С целью снижения расхода цемента и увеличения подвижности состава смеси вводится мелкий заполнитель – песок. В разрабатываемом составе следует применять песок с наименьшей межзерновой пустотностью. В связи с этим исследовались пески со смешанным зерновым составом (табл. 2). В табл. 2 представлены гранулометрические составы песков Ухтинского и Чаадаевского месторождений.

В табл. 3 приведены значения межзерновой пустотности и насыпной плотности исследуемого мелкого заполнителя.

Таким образом, анализ данных табл. 2–3 показал, что для дальнейшей разработки состава строитель-

Таблица 1. Изменение свойств состава от процентного содержания наноструктурирующей добавки

	Количество наномодифицированной добавки			
	–	10%	20%	30%
Нормальная густота цементного теста, %	28	34	41	43
Сроки схватывания	Начало 2ч 30мин Конец 5ч	Начало 50 мин Конец 1ч 40 мин	Начало 40 мин Конец 1ч 30 мин	Начало 20 мин Конец 1ч 15 мин
Общая пористость, %	41,1	40,3	38,3	36,9
Капиллярная пористость, %	18,7	16,7	12	9
Гелевая пористость, %	15,5	16,3	18,1	19,5
Контракционная пористость, %	7,0	7,3	8,2	8,8

Таблица 2. Гранулометрический состав мелкого заполнителя

Содержание фракций, %	Фракция песка, мм					
	Больше 2,5	2,5–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,16	Меньше 0,16
Песок Ухтинского месторождения	1,0	2,1	9,8	39,5	44,0	3,8
Песок Чаадаевского месторождения	–	0,3	12,1	58,1	26,6	2,9

Таблица 3. Плотность и межзерновая пустотность мелкого заполнителя

Размер фракций, мм	Чаадаевский песок		Ухтинский песок	
	Насыпная плотность, кг/м³	Межзерновая пустотность, %	Насыпная плотность, кг/м³	Межзерновая пустотность, %
0,315–0,16	1418,2	46,5	1460,1	44,9
0,63–0,315	1529,9	42,3	1522,3	42,6
1,25–0,63	1599,3	39,6	1530,3	42,3

Таблица 4. Коэффициент угловатости для песка Ухтинского месторождения

Наименование материала	$S_{факт}$, м²/кг	S_m, м²/кг	$K_{уг}$
Песок без просева	800	776,35	1,03
Песок фракций 0,16 мм – 0,315 мм; 0,315 мм – 0,63 мм; 0,63 мм – 1,25 мм в соотношении 70%:20%:10%	789	750,4	1,05
Песок фракций 0,63–0,315:0,315–0,16 (мм) в соотношении 70%:30%	756	652,3	1,09
Песок фракций 0,63–0,315:0,315–0,16 (мм) в соотношении 75%:25%	720	621,7	1,12
Песок фракций 0,63–0,315:0,315–0,16 (мм) в соотношении 80%:20%	700	582,39	1,20

ной 3D смеси следует применять песок Ухтинского месторождения.

Для нахождения оптимального соотношения между тремя основными фракциями песка (0,16 мм – 0,315 мм; 0,315 мм – 0,63 мм; 0,63 мм – 1,25 мм) оценивалось значение насыпной плотности мелкого заполнителя с применением метода математического описания физической адсорбции (табл. 4).

Установлено, что применение песка с соотношением фракций 0,63–0,315:0,315–0,16 (мм) 80% к 20%

Таблица 5. Технические требования к раствору бетонной смеси для 3D-печати

Требования	Значение показателя	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
Подвижность, мм	не более 7	4,4	3,8	6,7	5,4
Расслаиваемость, %	не более 10	2,5	1,9	7,8	8,8
Водоудерживающая способность	не менее 97	97,72	98,86	96,92	9,25
Пластическая прочность, Па	не менее 80	81,3	86,9	31,1	75,8
Скорость схватывания смеси, мин	не более 20 мин после экструзии	Начало 12 мин, конец – 30 мин	Начало 15 мин, конец – 20 мин	Начало 20 мин, конец – 67 мин	Начало 45 мин, конец – 90 мин

приводит к увеличению значения коэффициента угловатости ($K_{уг}$), что способствует прочному сцеплению частиц песка с цементной матрицей.

В процессе подбора состава бетонной смеси для 3D-печати малых архитектурных форм учитывались их технологические свойства. Исследовались четыре состава бетонной смеси для 3D-печати с разным количеством содержания наноструктурирующей добавки, песка, цемента. В табл. 5 представлены основные требования к смесям и результаты проведенных испытаний.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что, несмотря на подвижность, составы 3 и 4 нельзя использовать в технологии 3D печати малых архитектурных форм, так как длительная скорость схватывания смеси не дает возможности наносить смесь послойно. Поэтому для проведения дальнейших исследований будут применяться составы 1 и 2. В дальнейшем в составы будет вводиться пластификатор для повышения подвижности смеси.

ВЫВОДЫ

В результате исследования установлено, что добавление наноструктурирующей добавки в цементные составы увеличивает их плотность, сокращает сроки схватывания и снижает капиллярную пористость. Для оптимизации состава строительной 3D смеси рекомендовано использовать песок Ухтинского месторождения с соотношением фракций 0,63–0,315:0,315–0,16(мм) 80%:20%, что обеспечивает лучшую подвижность и сцепление с цементом. Составы с длительными сроками схватывания не подходят для строительной 3D печати, поэтому дальнейшие исследования будут направлены на сокращение сроков схватывания составов и повышения их подвижности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Торшин А.О., Боровикова С.О., Корчунов И.В., Потапова Е.Н. Разработка строительной смеси для 3D-печати. *Успехи в химии и химической технологии*. 2018;32(2):164-166.

2. Suvash Ch.P., Yi Wei D.T., Biranchi P., Ming J.T. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018: 311-319.

3. Елистраткин М.Ю., Лесовик В.С., Алфимова Н.И., Глаголев Е.С. О развитии технологий строительной печати. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2018;5:11-19.

4. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022;1(59):64-79.

5. Королев Е.В., Зыонг Т.К., Иноземцев А.С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати. *Вестник МГСУ*. 2020;6(15)6:834-846. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.834-846

6. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления на основе возможностей арсенала «Нано». *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;3(10):107-122. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122

7. Мырадов Р., Гулджанова Д., Назарлиева О. 3D-печать в строительстве: революция в строительных технологиях. *Вестник науки. 2024;*3-9(78):464-467.

8. Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури Саад Кхалил Шадид. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2021;18-4(80):428-439.

9. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Совершенствование технологии аддитивного строительного производства регулированием продолжительности перерывов в процессе 3D-печати. *Инженерный вестник Дона*. 2024;4(112):21.

10. Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. Подбор составов смесей для 3D печати. *Вестник евразийской науки*. 2021;13(3):25.

11. Жегера К.В., Лавров И.Ю., Трощев Д.В. Оптимизация синтеза наноструктурирующей добавки для применения в рабочей смеси 3D-принтера. *Региональная архитектура и строительство*. 2024;2(59):60-65. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_60

12. Патент CN 105753404A, B33Y70/00. *Cement-based material used for building 3D (three-dimensional) printing*. заяв. 13.02.2016, опубл. 13.07.2016.

13. Lavrov, I.Y., Zhegera, K.V., Troshchev, D.V. Designing a Construction 3-D Printer and Choosing a Kinematic Scheme for Moving the Printhead. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_2

14. Патент CN 108715531A, C04B28/02. *A kind of high thixotropic 3D printing concrete and preparation method thereof*. заяв. 12.06.2018, опубл. 28.08.2020.

15. Требухин А.Ф., Парри Д.Э. Современные трехмерные принтеры для аддитивного строительного производства. *Инженерный вестник Дона*. 2019;8(59):8.

16. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Якшина А.А., Пиндур С.В. Моделирование 3D печати малых архитектурных форм. *Вестник евразийской науки*. 2020;12(2):8.

17. Патент RU 2 729 086, C04B 28/04. *Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати*. заяв. 21.10.2019, опубл. 04.08.2020.

18. Клюев С.В., Клюев А.В., Шорстова Е.С. Композиционные вяжущие для фибробетонов, применяемых для 3-D печати. *Системные технологии*. 2019;1(30):47-51.

19. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018;20(4):122-134.

20. Байходжаева Ж.И., Естемесова А.С. Мелкозернистый бетон для 3Д (аддитивной) печати. *Endless light in science*. 2024;2:416-420.

21. Безногова О.Ю., Потапова Е.Н. Материалы для аддитивного строительного производства. *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;36(3)-(252):16-18.

22. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бабенко Д.С., Шведова М.А. Исследование влияния модифицирующих добавок на структурообразование и твердение цементных композитов для 3D-печати. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(1):112-124.

23. Жегера К.В., Рыжов А.Д., Соколова Ю.А., Шестаков Н.И. Закономерности структурообразования известковых композитов с добавкой на основе аморфных алюмосиликатов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(3):220–227. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-220-227

24. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Пуццоланическая активность керамзитовой пыли и ее зависимость от удельной поверхности. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013;3(25):98-104.

25. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов* [Электронный ресурс]. https://docs.cntd.ru/document/901710699. (15.11.2024).

26. Жегера К.В. *Разработка клеевой сухой строительной смеси с применением добавки на основе аморфных алюмосиликатов*. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Пенза; 2016. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01008558930. (15.11.2024).

27. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. https://docs.cntd.ru/document/871001226. (дата обращения: 15.11.2024).

28. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. https://docs.cntd.ru/document/1200003348. (дата обращения: 15.11.2024).

29. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. https://docs.cntd.ru/document/1200113456. (дата обращения: 15.11.2024).

30. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. https://docs.cntd.ru/document/1200100905. (дата обращения: 15.11.2024).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жегера Кристина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление качеством», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия, jegera@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8539-9687

Дасаева Наталья Андреевна – лаборант – исследователь НИС, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия, dasaeva_na@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0000-9444-9404

ВКЛАД АВТОРОВ

Жегера К.В. – научное руководство, сбор, анализ и обработка результатов, написание статьи.

Дасаева Н.А. – подготовка образцов, проведение испытаний.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 03.12.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31

CC BY 4.0

A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions

Nikolay M. Sharpar*, Leonid I. Zhmakin, Ilya N. Vlasov, Elena S. Bokova
Kosygin Russian State University, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: sharpar753@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Textile industrial materials, particularly in the form of multilayer packages, are extensively utilized as thermal insulation coatings in construction. One of the functional characteristics of these materials is their effective performance under conditions of strong wind exposure. The thermal insulation characteristics of textile thermal insulation materials depend on the value of their air permeability, while minimal thermal resistance is observed from the blowing side. **Materials and research methods.** The article lists methods that allow for the most accurate calculation of the thermal resistance of multilayer packages consisting of textile building materials under wind-blowing conditions. In this case, the thermal-insulating properties of the materials included in the package will depend on their air permeability. **Results and discussion.** Our mathematical model used for calculating the thermal resistances of building envelopes, containing thermal insulation packages based on textile materials, includes data on the air permeability of individual layers, as well as on the thickness of their air interlayers. The study presents a scheme of thermal insulation layers that shows temperature curves plotted on it. Stationary medium conditions were used as initial information on temperature distribution between the layers. Further research established that an increase in air velocity of the package affected by the wind influenced the reduction of thermal resistance. **Conclusion.** The study presents formulas used in determining the thermal resistance of insulating layers and interlayers of building envelopes affected by the wind, under conditions of frontal impact of the air flow, taking into account the established parameters of air permeability of the layers within the package.

KEYWORDS: air permeability coefficient, textile materials, heat-insulating building envelopes, thermal resistance, material packages

FOR CITATION:
Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Vlasov I.N., Bokova E.S. A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):23–31. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31. – EDN: URPYBE.

INTRODUCTION

Technical fiber materials and webs are widely used in construction, industry and other sectors of the economy. They can be made of various materials such as glass fiber, basalt fiber, ceramic fibers, mineral wool and others. These materials, as a rule, consist of micro and nanoscale fibers, have a high thermal insulation ability, which allows them to be used for effective thermal insulation of facades and other building elements. In multilayer building structures, fibrous materials and technical fabrics [1–2] perform not only the function of thermal insulation, but also protection from moisture [3] and noise. They can be applied both as insulation for external walls and roofs, and for internal partitions and ceilings. In addition, these materials can be used to create ventilated facade systems, which can improve the thermal protection properties of the building [4–5] and reduce energy consumption for heating and air conditioning. Technical fiber materials and webs are also widely used in industry for thermal and acoustic insulation of pipelines, apparatus and equipment. They can be manufactured in different structures and densities, allowing the selection of the most suitable material for a particular application. Thus, technical fiber materials and webs are important elements in construction and industry. Their high heat-insulating,

© Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Vlasov I.N., Bokova E.S., 2025

sound-insulating and moisture-protective properties make them indispensable in creating comfortable living and working conditions in buildings and structures.

When designing and calculating multilayer building structures such as walls, roofs, ceilings and other building elements, it is necessary to take into account the thermal insulation properties of each of the layers. However, in reality, the contact between layers is discrete, resulting in contact thermal resistances in the contact zones of individual layers. These resistances can significantly affect the heat transfer [6–7] through the structure and hence its thermal efficiency. To account for contact thermal resistances in the contact zones of individual layers in multilayer structures, it is necessary to carry out thermal calculations taking into account the thermal properties of each layer and heat losses in the contact zones between them. In addition, such factors as the thickness of each layer, material density, thermal conductivity coefficient [8-9], temperature gradients and other parameters [10-11] should be taken into account. It is important to note that contact thermal resistances can have both positive and negative effects on the thermal efficiency of a structure. For example, in some cases, the presence of contact resistances can reduce heat loss through a structure and improve its efficiency [12]. In other cases, the presence of contact resistances can lead to poorer thermal efficiency and increased energy consumption for heating or air conditioning. In this regard, consideration of contact thermal resistances in the contact zones of individual layers in multilayer building structures is an important step in their design and calculation. This allows to optimize heat transfer through the structure, increase its thermal efficiency and reduce energy consumption for heating or air conditioning. It inevitably leads to a temperature jump at the contact points and to an increase in the temperature difference, which cannot be neglected (especially if the local heat flux density is significant). The heat flux at the approach to the contact is separated: one part goes through the air gap and the other part goes through the spots of actual contact between the fibers. The first thermal resistance depends on the thermal conductivity of the air medium and the size of the gap, since in most cases convection does not develop in the gaps, it has a surface character. The second resistance, on the other hand, has a volumetric character. In a thermal circuit both these resistances are included in parallel, so their inverse values (otherwise thermal conductivities) are summed up. It is especially important to take into account contact resistances when calculating the dynamics of temperature fields in multilayer envelope structures [13–15].

According to the phenomenological theory, the concept of contact thermal resistance is conditional and is not limited only by the presence of the interface. Contact thermal resistance describes a phenomenon in which an external heat flux density causes a potential difference at the interface of two different materials. However, contact thermal resistance can manifest itself not only at the interface of phases, but also within the same phase in the presence of micro and nanostructural structural defects. These defects can be caused by various factors such as the presence of dislocations, impurities and other inhomogeneities in the crystal structure. Contact thermal resistance is an important parameter for understanding the thermal properties of materials and can affect the performance of heat transfer devices such as heat exchangers and thermoelectric devices. In addition, contact thermal resistance can be used to measure various physical parameters of materials such as thermal conductivity and temperature gradients. Thus, the concept of contact thermoresistance has wide applications in various fields of physics and materials science and is not limited to the presence of an interface. Its understanding and study is important for the development of new technologies and improvement of existing methods of measuring physical parameters of materials. But in practice, the introduction of the concept of temperature jump at the boundary of two layers has some advantages because its magnitude can be easily determined experimentally by linear extrapolation of the temperature distribution in a multilayer body [13].

Contact resistance is most easily found in experiments using the stationary heat flow method, although in some cases it can be evaluated analytically using a theoretical analysis of model contacts [13, 14].

In order to reduce the energy intensity of the gross domestic product, interest in the rational consumption of thermal energy has increased [16]. To do this, the energy saving program [16] provides for an increase in the heat-shielding characteristics of external envelopes [17, 18] of public, residential and industrial buildings.

Selection of appropriate thermal insulation coatings [19] as enclosing structures in buildings is determined by taking into account the following factors such as temperature and humidity conditions of the environment, physical properties of the textile material, including its moisture and air permeability, as well as thermal resistance, the location of construction [20–22].

MATERIALS AND METHODS

Building envelopes in the form of a package, consisting of textile sheets, are under the influence of an air flow directed perpendicular to the wind-affected surface. The paper presents the results of a study of the heat-protective characteristics of textile bags blown by an air stream with a velocity directed along the normal to their surface.

Fig. 1 shows a scheme of an ‘n’ number of textile fabric layers under the influence of the constant flow of a thermal fluid. The model includes the following layers:

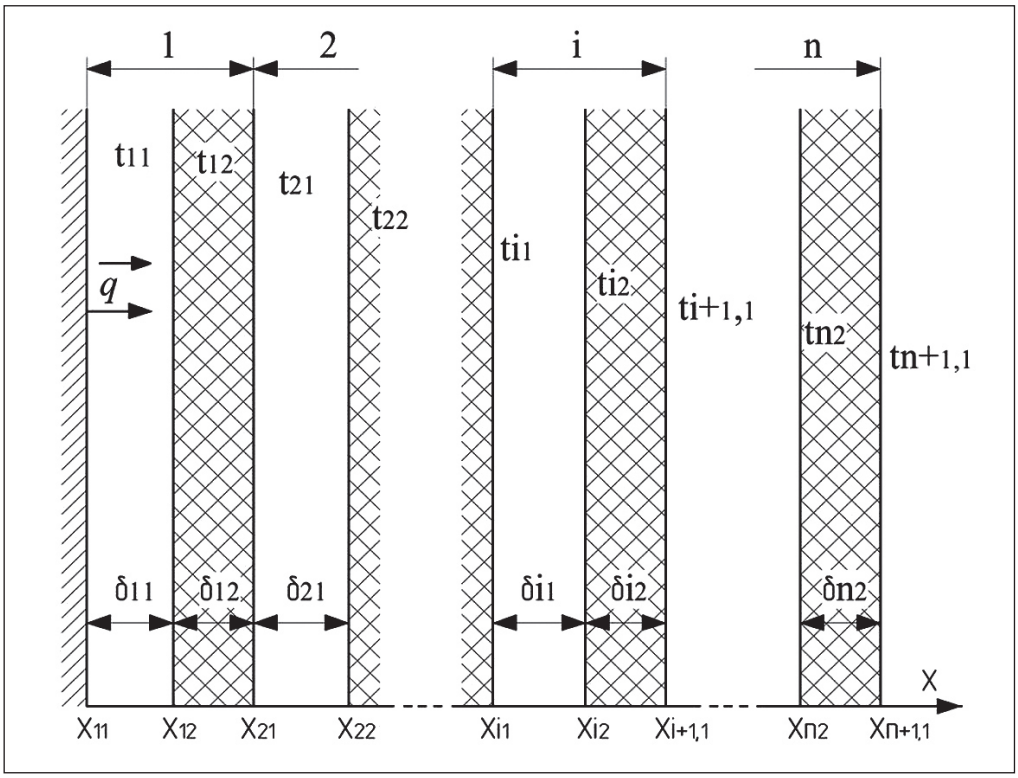


Fig. 1. Scheme of thermal-insulating layers of the package

the first layer, which is internal and is located near the impermeable surface; the 'i' layer; and partially the second, outer 'n' layer and the surrounding layer of air defined by this formula: $x > x_{n+1,1}$. The layers of textile fabric have several thickness parameters of material: δ_{i2} and an air gap: δ_{i1}; heat flux density vector: $\vec{q}$ on an impenetrable surface: $(x = x_{11}+0)$ numerically equals to q in axis direction x, flow rate: $\vec{w}_{\infty}$ air affecting the package; temperatures on the inner surface of the layer, as well as on the surface of the textile fabrics inside it and on the surface of the package itself, are indicated, respectively, as: t_{i1}, t_{i2} and $t_{n+1,1}$. The air flows opposite to the heat flow. The speed of the air passing through layer 'i' is set and is constant inside it [22]. Due to the insignificant thickness of the air layer, the normal to the surface components of the flow velocity of the thermal fluid in the gap can be represented by the Taylor series

$$w_i(x) = w_i - m_i \cdot (x_{i2} - x), \quad (1)$$

where $m_i = (w_i - w_{i-1})/\delta_{i1}$.

Figure 2 shows a graph of the velocity through the layers of textile fabrics forming the package.

According to the source [23], heat transfer is determined by adding an effective coefficient of thermal conductivity to the energy equation, which transfers heat due to the thermal conductivity of air in the material and radiation.

The heat flux affecting the model is considered one-dimensional, according to Fig. 1 from left to right, heat is transferred by radiation and heat conduction, and from right to left only by convection. Under the conditions of a one-dimensional problem, when the following conditions are met: $w_x = -w$, $w_y = w_z = 0$, $d_i/d_x = f(x)$, $d_i/d_y = d_i/d_z = 0$, then for the layer 'i', we can write the energy equation differentially, which will take the following form:

$$\lambda_{i1}\left[\frac{d^2 t_{i1}(x)}{dx^2}\right] = -c_{i1} \cdot \rho_{i1} \cdot w_i(x)\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]. \quad (2)$$

Between layers 'i' and (i-1) within a package of textile fabrics, the boundary conditions maintain the equality of heat fluxes and temperatures at their boundary:

$$t_{i1}(x_{i1}) = t_{i1}, \quad (3)$$

$$x_i = \lambda_{i1}^{\ni}\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]_{x_{i1}} + \alpha_{i1} \cdot (t_{i1} - t_{i2}), \quad (4)$$

where

$$x_i = \lambda_{i-1,2}^{\ni}\left[\frac{dt_{i-1,2}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}}, \quad (5)$$

$$\alpha_i = c_0 \cdot \varepsilon_i^{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{i1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{i2}}{100}\right)^4\right]/(t_{i1} - t_{i2}). \quad (6)$$

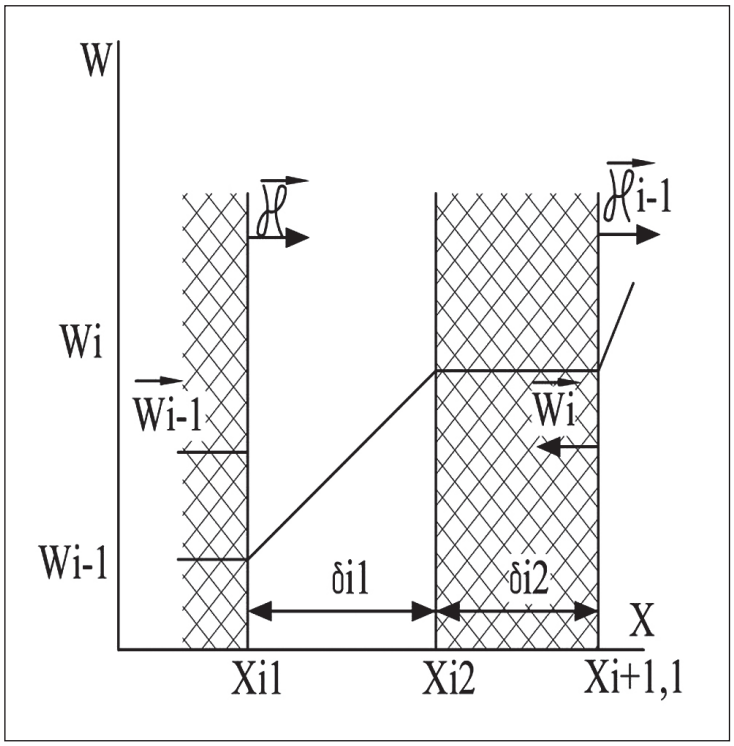


Fig. 2. Graph of the speed of the air flowing through the layers of textile fabric forming a package: w_i – air speed in the layer of the thermal fluid flow; $w(x)$ – speed reduction in the air layer 'i' between the webs of textile material of 'i' and (i–1); $\vec{x}_i$ – the density vector of the radiation-conductive flow along the inner surface of layer 'i' of the package

When considering the boundary between layers 'i' and (i-l), the value x_i is their conductive heat flux, and α_i – is the coefficient of heat transferred by radiation between the layers of material 'i' and (i-1) on a flat interlayer.

$$\frac{1}{\varepsilon_i^{np}} = \frac{1}{\varepsilon_{i-1,2}} + \frac{1}{\varepsilon_{i2}} - 1. \quad (7)$$

Here: ε_i^{np}, $\varepsilon_{i-1,2}$, ε_{i2} – correspond to the reduced degree of emissivity of the interlayer at the border of (i-1) and 'i' layers within the given package of textile fabrics; T_i – absolute temperature, [K].

According to the assumptions above, the differential form of the energy equation for the 'i' layer of the material will be similar to the form of the porous layer equation [24]:

$$\lambda_{i2}^{э}\left[\frac{d^2 t_{i2}(x)}{dx^2}\right] = -c_{i1}\cdot\rho_{i1}\cdot w_i\left[\frac{dt_{i2}(x)}{dx}\right]. \quad (8)$$

Boundary conditions characterize the equality of heat fluxes and temperatures between the given materials of the package and the air gap of the 'i' layer:

$$t_{i2}(x_{i2}) = t_{i2}, \quad (9)$$

$$-\lambda_{i1}\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}} + \alpha_i\cdot(t_{i1} - t_{i2}) = -\lambda_{i2}^{э}\left[\frac{dt_{i2}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}}. \quad (10)$$

Equations (2) and (8) refer to linear differential equations of the 2nd order, but the latter equation comes with constant coefficients, and their solutions can be represented as:

$$t_{i1}(x) = t_{i1} - \frac{D_i(y' - y'_{i1})}{\alpha_i[\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})]}, \quad (11)$$

$$t_{i1}(x) = t_{i2} - \frac{\chi_i\alpha_{i2}[\exp(-y_{i2}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})]}{\lambda_{i2}^{э} w_i[\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})]}\cdot \cdot\left\{1 - \exp\left[-\frac{w_i\cdot(x - x_{i2})}{a_{i2}}\right]\right\}, \quad (12)$$

$$y' = 2\pi^{-0,5}\int_0^y \exp\left(-y^2\right)dy, \quad (13)$$

where $D_i = [\pi\alpha^2/(2\lambda_{i1}\cdot c_{i1}\cdot\rho_{i1}\cdot m_i]^{0,5}$; variable $y = w_i(x)/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$, and between the layers $y_{i1} = w_{i-1}/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$ and $y_{i2} = w_i/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$; a_{i1} – coefficient of thermal diffusivity in the air gap $a_{i1} = \lambda_{i2}^{э}/(c_{i1}\cdot\rho_{i1})$; integral values y' are presented according to [25]. Value χ_{i+1} is calculated by the recursive formula, provided that $\chi_i = q$:

$$\chi_{i+1} = \chi_i\cdot\frac{\exp(-y_{i2}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}\cdot \cdot\exp\left(-\frac{w_i\cdot\delta_{i2}}{a_{i2}}\right). \quad (14)$$

Using equations (11) and (12), we can determine the temperature difference Δt at the boundaries of the air gap or material, according to the formula $R = \Delta t/q$ thermal resistance can be represented as:

$$R_{i1} = \frac{\chi_i}{q \cdot \alpha_i} \cdot \frac{D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}, \quad (15)$$

$$R_{i2} = \frac{\chi_i \cdot a_{i2}}{q \cdot w_i \cdot \lambda_{i2}^{э}} \cdot \frac{\exp(-y_{i2}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right)\right]. \quad (16)$$

Thermal resistance to heat transfer from the outer surface of the package of textile fabrics to the environment can be calculated by the formula: $R_{n+1} = \chi_{i+1} \cdot [q(\alpha_p + \alpha_k)]^{-1}$, when the heat transfer coefficient can be calculated by equation (6) when replacing $T_{n+1,2}$ and $t_{n+1,2}$ on ambient temperature, and then instead of ε_i^{np} substitute the degree of blackness of the outer material included in the package we are considering. According to the formula of G.N. Kruzhilin [22], it is possible to calculate the coefficient of convective heat transfer for the front air flow point:

$$Nu = 1{,}04 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}5} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}.$$

The thermal resistance of the entire package consisting of textile fabrics is determined from the sum of the thermal resistances of the individual materials included in its composition, air gaps and thermal resistance of heat transfer to the environment.

Next, we analyze the passages to the limit in the obtained formulas. In layers where air velocities are insignificant, it can be represented as $y_{i1}y_{i2} < 0{,}02$ and $w_i\delta_{i2}/a_{i2} < 0{,}1$, after that, formulas (14), (15) and (16) are simplified by expanding into a series of errors by more than 1%, then the equation for calculating the corresponding thermal resistance will take the following form:

$$R_{i1} = \frac{\chi_i}{q} \cdot \frac{1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})}{\frac{\lambda_{i1}}{\delta_{i1}} + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]}, \quad (17)$$

$$R_{i2} = \frac{\chi_i \cdot \delta_{i2}}{q \cdot \lambda_{i2}^{э}} \cdot \frac{\left(1 - y_{i2}^2 - y_{i1}^2\right) + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]}{1 + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]} \cdot \left[1 - \frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right], \quad (18)$$

$$\chi_{i+1} = \chi_i \cdot \left[1 - y_{i2}^2 - y_{i1}^2 - \frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}} + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right)^2\right]. \quad (19)$$

Two limiting transitions are possible, the first one is carried out at $w_i \to 0$; from equations (14)–(19) it is possible to derive the following dependencies describing the heat transfer during the absence of airflow:

$$\chi_i = q,\ R_{i1} = 1/(\alpha_i + \lambda_{i1}/\delta_{i1}),\ R_{i2} = \delta_{i2}/\lambda_{i2}^{э}. \quad (20)$$

The second limit transition occurs at high flow rates of the medium. Provided that material 'i' included in the package has high air permeability $w_i\delta_i/a_i > 5$, then, according to equation (14), we can make: $\chi_{i+1} = 0$ with an error of no more than 1%. The thermal resistances of the $(i+1)$ layer and subsequent layers with a higher number acquire a value equal to zero, and the temperatures in these layers become identical to the ambient temperatures, which corresponds to curve 5 in Fig. 3. Under such conditions, the heat-protective mechanisms of materials are reduced to wind-protective ones, and therefore the expediency of using a wind-protective layer becomes apparent. Building structures can serve as an example. The usage of a low-permeable layer contributes to the effectiveness of thermal protection functions of the other layers of the package.

RESULTS AND DISCUSSION

To apply this calculation of thermal resistance to construction objects, it is necessary to determine the air permeability of individual layers [26, 27] included in the package under the influence of natural airflow, and also to determine the patterns of changes in the thickness of the air layers. Since these values are initially unknown, we must resort to using the dependence of air permeability on the heat-shielding properties of the heat-insulating package. To solve the problem, we use a rational assumption from a physical point of view, but not proven empirically, that the flow rate of the medium in the 'i' layer is proportional to its air permeability and the dynamic pressure of the air flow of the medium, retained by the materials in the package:

$$w_i = b_{hi} \cdot \rho_i(w_{i+1}{}^2 - w_i^2)/2h_i, \quad (21)$$

where h_i – is pressure fluctuation, which was determined at air permeability: b_{hi}. A similar formula was used by P.A. Kolesnikov [28], but the change in the thickness of the interlayers during the calculations

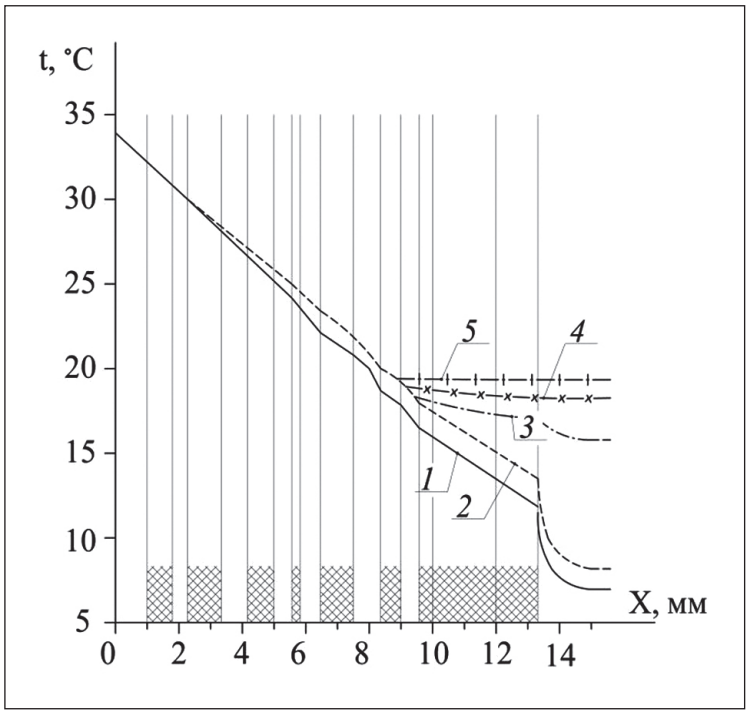


Fig. 3. The layout of the temperature curves obtained by calculation: 1 – $w_{\infty} = 0$, $a_i = 0$; 2 – $w_{\infty} = 0$, $a_i \neq 0$; 3 – $w_{\infty} = 4$ м/с, $a_i \neq 0$; 4 –$w_{\infty} = 10$ м/с, $a_i \neq 0$; 5 – $w_{\infty} = 20$ м/с, $a_i \neq 0$

was not taken into account. Fig. 3 shows the layout of the temperature curves, with the ones outside of the scheme calculated conditionally. During calculations, the method of successive approximations was used and the temperature curves were used as the initial temperature distribution under the condition that the air was considered to be stationary, and there was no heat transfer due to radiation in the air gap.

According to the diagram presented on Fig. 3, the decrease in the thermal resistance of the package is affected by an increase in the speed of the airflow. Along the curves in Fig. 3, both of the previously described cases can be traced. As shown on the diagram, in the inner layers of the package, the temperature curves are close to coincidence; this phenomenon can be caused by the low speed of the air flow. Curve 5 also indicates that with an increase in the speed of the airflow, the thermal resistance on the outer surface of the package decreases.

CONCLUSION

- The paper considers a non-standard approach, and provides equations for calculating the thermal resistances of both individual layers and the thermal insulation package as a whole, under conditions of a frontal air flow.
- It is noted that during real tests of the heat-shielding package, the thickness of the air layers will decrease, and the values of penetration of the cold airflow into the material will become higher;
- Therefore, this approach more reliably reflects the main regularities of heat transfer through a heat-shielding package under ambient wind-blowin conditions, thereby leading a complicated solution of the problem to a much simpler research of air permeability and deformation of the layers within the package.

REFERENCES

1. Ananyev A.I., Khorov O.A., Evseev L.D. et al. Thermal Technical Indicators of Building Materials and Structures. *Stroitelny Expert*. 2005;16(203):17-23. (In Russ.)

2. Kiselev I.Ya. *Heat transfer through fiber and cellular effective heat-insulating materials.* In book: Building physics in the 21st century. M.: NII SF; 2006. (In Russ.)

3. Bogoslovsky V.K., Gagarin V.G. Moisture transfer in materials of enclosing structures. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia*. Vol. 2. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 1995. 50-53. (In Russ.)

4. Bogoslovsky V.N., Gagarin V.G., Mogutov V.A. Heat-protective properties of enclosing structures. In: *Russian architectural and construction encyclopedia*. T. 2. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation; 1995. 460-462. (In Russ.)

5. Bogoslovskiy V.N. *Stroitelnaya Teplofizika: Teplofizicheskie osnovy heating, ventilation and air conditioning*. SPb: AVOK Severo-Zapad; 2006. 399. (In Russ.)

6. Gagarin V.G. Theoretical preconditions of calculation of the reduced resistance to heat transfer of enclosing structures. *Stroitelnye materialy*. 2010;12:4-12. (In Russ.). – EDN: NQTZMT

7. Gagarin V.G. Teplofizicheskie problemy sovremennye wall enclosing structures of multistoried buildings. Academia. *Architecture and Construction*. 2009;5:297-305. (In Russ.). – EDN: MTPDUP

8. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Methods of the theory of heat conduction*. M: Vysshaya shkola; 1982. 304. (In Russ.)

9. Kiselev I.Ya. Thermal conductivity of effective heat-insulating building materials and products. *Academia*. 2004;4:36-41. (In Russ.)

10. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat exchange*. Novosibirsk: Atomizdat; 1970. 416. (In Russ.)

11. Lykov A.V. *Heat and Mass Exchange*: (Reference book). 2nd ed., rev. and supplement. M: Energia; 1978. 480.

12. Malyavina E.G. *Heat Losses of a Building: Reference Manual*. M: AVOK-PRESS; 2007. 144.

13. Shlykov Y.P., Ganin E.A., Tsarevsky S.N. *Contact thermal resistance*. M: Energia; 1977. 327. (In Russ.)

14. Popov VM. *Heat exchange in the contact zone of detachable and non-detachable joints*. M: Energia; 1971. 216. (In Russ.). – EDN: RELYGR

15. Ivanov V.V., Vidin Yu.V., Kolesnik V.A. *Processes of heating of multilayer bodies by radiant-convective he*at. Rostov n/D: Izd. Rost. un-ta; 1990. 159. (In Russ.)

16. Energosberezhenie i upravlenie energeticheskoe effektivnosti. Available at: https://www.audar-info.ru/na/editSection/index/type_id/3/doc_id/5265/release_id/18634/ (date of reference: 01.09.2022). (In Russ.)

17. Thermal protection of buildings. Available at: http://sniprf.ru/sp50-13330-2012 (date of reference: 08.09.2022). (In Russ.)

18. Baikov I.R., Smorodova O.V., Trofimov A.Yu., Kuznetsova E.V. Experimental study of heat-insulating nanomaterials on the basis of aerogels. *Nanotechnologies in construction*. 2019;11(4):462-477. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477 EDN: UJZLCI

19. Sharpar N.M. *Development of methods for studying the thermophysical properties of nonwoven materials*. Dissertation ... candidate of technical sciences: 05.19.01. Moscow State University of Design and Technology. Moscow, 2013. – S. 135. – EDN: SUWQHL

20. Stroitelnaya klimatologiya. Available at: https://docs.cntd.ru/document/573659358 (date of reference: 10.09.2022). (In Russ.)

21. Designing of thermal protection of buildings. Available at: https://www.dokipedia.ru/document/1724245 (date of reference: 15.09.2022). (In Russ.)

22. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha*. M: Energia; 1975. 488.

23. Dulnev G.N., Zarichniak YP. *Heat conductivity of mixtures and composite materials.* L: Energia; 1974. 264. (In Russ.)

24. Kornyukhin I.P. *Heat and mass exchange in heat engineering of textile productions: Textbook for universities*. Moscow: A.N. Kosygin Moscow State Technical University; 2004. 598. (In Russ.)

25. *Special functions. Formulas, Graphs, Tables*. Per. from the 6th revised German edition by Jahnke E., Emde F., Loesch F. 3rd ed. stereotype. M: Nauka; 1977. 344.

26. Zhmakin L.I., Osmanov Z.N., Sharpar N.M. Experimental Determination of the Longitudinal Component of the Coefficient of Air Permeability of Textile Materials. *Fibre Chemistry*. 2017 May;49(1):60-63. https://doi.org/10.1007/s10692-017-9843-5 EDN: XNNYTI

27. Sharpar N.M., Zhmakin L.I. Experimental determination of air permeability coefficient of textile materials. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Technologiya tekstilnoy promyshlennosti*. 2012;6(342):148-151. (In Russ.). – EDN: RDUVIF

28. Kolesnikov P.A. *Fundamentals of design of heat-protective clothing*. Moscow: Light Industry; 1971. 109. (In Russ.)

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai M. Sharpar – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety of the Kosygin Russian State University, Moscow, sharpar753@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5595-2779

Leonid I. Zhmakin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety of the Kosygin Russian State University, Moscow, li_zhmakin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4315-2659

Ilya N. Vlasov – Lecturer of the Department of Technology of Artistic Processing of Materials of the Kosygin Russian State University, Moscow, Nickolaich99@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-5749-9227

Elena S. Bokova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Polymer Materials and Nanocomposites of the Kosygin Russian State University, Moscow, esbokova@ya.ru, https://orcid.org/0000-0001-7769-9639

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Nikolai M. Sharpar – material collection, article writing, concept of methodology, article conclusions.

Leonid I. Zhmakin – scientific guidance, methodology development, source text writing, text revision.

Ilya N. Vlasov – analytical review of "methods for determining the thermal resistance of a multilayer package", collection, analysis and processing of the obtained results, writing the article.

Elena S. Bokova – scientific editing of the text, conclusions of the article.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 05.02.2025; accepted for publication 10.02.2025.

Научная статья / Original article
УДК 536.2:677.017
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31

CC BY 4.0

Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува

Николай Михайлович Шарпар*, Леонид Иванович Жмакин, Илья Николаевич Власов, Елена Сергеевна Бокова

Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sharpar753@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Текстильные материалы технического назначения в виде многослойных пакетов находят широкое применение в качестве теплоизоляционных покрытий в строительстве. Одной из функциональных характеристик такого рода материалов является их эффективная работа в условиях интенсивного обдува ветром. Теплоизоляционные характеристики текстильных теплоизоляционных материалов зависят от величины их воздухопроницаемости, при этом минимальное термическое сопротивление наблюдается со стороны обдува. **Материалы и методы исследования.** В статье предложена методика, позволяющая рассчитать термическое сопротивление многослойного пакета, состоящего из текстильных строительных материалов в условиях обдува. Показано, что теплоизоляционные свойства материалов, входящих в состав пакета, зависят от их воздухопроницаемости. **Результаты и обсуждение.** Рассматриваемая в работе математическая модель по определению термических сопротивлений ограждающих конструкций, содержащих теплоизоляционные пакеты на основе текстильных материалов, включает данные по воздухопроницаемости отдельных слоёв, а также по толщине их воздушных прослоек. В работе приведена схема теплоизоляционных слоев, включающая температурные кривые. В качестве исходной информации по распределению температур в слоях приняты условия неподвижной среды, а также предположение, что повышение скорости воздуха при обдуве пакета влияет на уменьшение его термического сопротивления. **Заключение.** В работе приведены

уравнения по определению термических сопротивлений теплоизоляционных слоев и прослоек ограждающих конструкций, с учетом их воздухопроницаемости при обдуве воздушным потоком разной степени интенсивности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коэффициент воздухопроницаемости, текстильные материалы, теплоизоляционные ограждающие конструкции, термическое сопротивление, пакеты материалов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Власов И.Н., Бокова Е.С. Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):23–31. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31. – EDN: URPYBE.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья / Original article
УДК 536.2:677.017
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31

CC BY 4.0

Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува

Николай Михайлович Шарпар*, Леонид Иванович Жмакин, Илья Николаевич Власов, Елена Сергеевна Бокова
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sharpar753@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Текстильные материалы технического назначения в виде многослойных пакетов находят широкое применение в качестве теплоизоляционных покрытий в строительстве. Одной из функциональных характеристик такого рода материалов является их эффективная работа в условиях интенсивного обдува ветром. Теплоизоляционные характеристики текстильных теплоизоляционных материалов зависят от величины их воздухопроницаемости, при этом минимальное термическое сопротивление наблюдается со стороны обдува. **Материалы и методы исследования.** В статье предложена методика, позволяющая рассчитать термическое сопротивление многослойного пакета, состоящего из текстильных строительных материалов в условиях обдува. Показано, что теплоизоляционные свойства материалов, входящих в состав пакета, зависят от их воздухопроницаемости. **Результаты и обсуждение.** Рассматриваемая в работе математическая модель по определению термических сопротивлений ограждающих конструкций, содержащих теплоизоляционные пакеты на основе текстильных материалов, включает данные по воздухопроницаемости отдельных слоёв, а также по толщине их воздушных прослоек. В работе приведена схема теплоизоляционных слоев, включающая температурные кривые. В качестве исходной информации по распределению температур в слоях приняты условия неподвижной среды, а также предположение, что повышение скорости воздуха при обдуве пакета влияет на уменьшение его термического сопротивления. **Заключение.** В работе приведены уравнения по определению термических сопротивлений теплоизоляционных слоев и прослоек ограждающих конструкций, с учетом их воздухопроницаемости при обдуве воздушным потоком разной степени интенсивности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коэффициент воздухопроницаемости, текстильные материалы, теплоизоляционные ограждающие конструкции, термическое сопротивление, пакеты материалов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Власов И.Н., Бокова Е.С. Методика определения термического сопротивления многослойного пакета теплоизоляционных текстильных материалов в условиях обдува. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):23–31. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31. – EDN: URPYBE.

A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions

Nikolay M. Sharpar*, Leonid I. Zhmakin, Ilya N. Vlasov, Elena S. Bokova
Kosygin Russian State University, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: sharpar753@mail.ru

© Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Власов И.Н., Бокова Е.С., 2025

ABSTRACT

Introduction. Textile industrial materials, particularly in the form of multilayer packages, are extensively utilized as thermal insulation coatings in construction. One of the functional characteristics of these materials is their effective performance under conditions of strong wind exposure. The thermal insulation characteristics of textile thermal insulation materials depend on the value of their air permeability, while minimal thermal resistance is observed from the blowing side. **Materials and research methods.** The article lists methods that allow for the most accurate calculation of the thermal resistance of multilayer packages consisting of textile building materials under wind-blowing conditions. In this case, the thermal-insulating properties of the materials included in the package will depend on their air permeability. **Results and discussion.** Our mathematical model used for calculating the thermal resistances of building envelopes, containing thermal insulation packages based on textile materials, includes data on the air permeability of individual layers, as well as on the thickness of their air interlayers. The study presents a scheme of thermal insulation layers that shows temperature curves plotted on it. Stationary medium conditions were used as initial information on temperature distribution between the layers. Further research established that an increase in air velocity of the package affected by the wind influenced the reduction of thermal resistance. **Conclusion.** The study presents formulas used in determining the thermal resistance of insulating layers and interlayers of building envelopes affected by the wind, under conditions of frontal impact of the air flow, taking into account the established parameters of air permeability of the layers within the package.

KEYWORDS: air permeability coefficient, textile materials, heat-insulating building envelopes, thermal resistance, material packages.

FOR CITATION:
Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Vlasov I.N., Bokova E.S. A method for determining the thermal resistance of a multilayer package of thermal insulation textile materials under blowing conditions. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):23–31. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-23-31. – EDN: URPYBE.

ВВЕДЕНИЕ

Волокнистые материалы и полотна технического назначения находят широкое применение в строительстве, промышленности и других отраслях экономики. Они могут быть изготовлены из различных материалов, таких как стекловолокно, базальтовое волокно, керамические волокна, минеральная вата и другие. Эти материалы, как правило, состоят из волокон микро и наноразмерного ряда, обладают высокой теплоизоляционной способностью, что позволяет использовать их для эффективной тепловой изоляции фасадов и других элементов зданий. В многослойных строительных конструкциях волокнистые материалы и полотна технического назначения [1–2] выполняют не только функцию теплоизоляции, но и защиты от влаги [3] и шума. Они могут быть применены как в качестве утеплителя для наружных стен и крыш, так и для внутренних перегородок и потолков. Кроме того, эти материалы могут быть использованы для создания систем вентилируемых фасадов, что позволяет улучшить теплозащитные свойства здания [4–5] и снизить энергопотребление на обогрев и кондиционирование воздуха. Волокнистые материалы и полотна технического назначения также широко используются в промышленности для теплоизоляции и звукоизоляции трубопроводов, аппаратов и оборудования. Они могут быть изготовлены с различной структурой и плотностью, что позволяет выбрать наиболее подходящий материал для конкретного применения. Таким образом, волокнистые материалы и полотна технического назначения являются важными элементами в строительстве и промышленности. Их высокие теплоизоляционные, звукоизоляционные и влагозащитные свойства делают их незаменимыми в создании комфортных условий жизни и работы в зданиях и сооружениях.

При проектировании и расчете многослойных строительных конструкций, таких как стены, кровли, потолки и другие элементы зданий, необходимо учитывать теплоизоляционные свойства каждого из слоев. Однако в реальности контакт между слоями имеет дискретный характер, что приводит к возникновению термических сопротивлений в зонах контактов отдельных слоев. Эти сопротивления могут значительно повлиять на теплопередачу [6–7] через конструкцию и, следовательно, на ее тепловую эффективность. Для учета контактных термических сопротивлений в зонах контактов отдельных слоев в многослойных конструкциях необходимо проводить теплотехнические расчеты с учетом термических свойств каждого слоя и тепловых потерь в зонах контакта между ними. Кроме того, необходимо учитывать такие факторы, как толщина каждого слоя, плотность материала, коэффициент теплопроводности [8–9], температурные градиенты и другие параметры [10–11]. Важно отметить, что контактные термические сопротивления могут иметь как положительный, так и отрицательный эффект на тепловую эффективность конструкции. Например, в некоторых случаях наличие контактных сопротивлений может уменьшить теплопотери через конструкцию и повысить ее эффективность [12]. В других случа-

ях наличие контактных сопротивлений может привести к ухудшению тепловой эффективности и повышенному потреблению энергии на обогрев или кондиционирование воздуха. В связи с этим учет контактных термических сопротивлений в зонах контактов отдельных слоев в многослойных строительных конструкциях является важным этапом при их проектировании и расчете. Это позволяет оптимизировать теплопередачу через конструкцию, повысить ее тепловую эффективность и снизить потребление энергии на отопление или кондиционирование воздуха.

Тепловой поток при подходе к контакту разделяется: одна часть идет через воздушный зазор, а другая через зоны фактического контакта между волокнами. Первое термическое сопротивление зависит от теплопроводности воздушной среды и величины зазора; поскольку в большинстве случаев конвекция в зазорах не развивается, то оно носит поверхностный характер. Второе же сопротивление имеет объемный характер. В тепловой цепи оба эти сопротивления включены параллельно, поэтому их обратные величины (иначе термические проводимости) суммируются. Особенно важен учет контактных сопротивлений при расчетах динамики температурных полей в многослойных ограждающих конструкциях [13–15].

Согласно феноменологической теории, понятие контактного термосопротивления является условным и не ограничивается только наличием границы раздела фаз. Контактное термосопротивление описывает явление, при котором внешняя плотность теплового потока вызывает появление разности потенциалов на границе раздела двух различных материалов. Однако контактное термосопротивление может проявляться не только на границе раздела фаз, но и внутри одной фазы при наличии микро- и наноструктурных дефектов. Эти дефекты могут быть вызваны различными факторами, такими как наличие дислокаций, примесей и других неоднородностей в кристаллической структуре. Контактное термосопротивление является важным параметром для понимания тепловых свойств материалов и может влиять на эффективность работы теплообменных устройств, таких как теплообменники и термоэлектрические устройства. Кроме того, контактное термосопротивление может быть использовано для измерения различных физических параметров материалов, таких как теплопроводность и температурные градиенты. Таким образом, понятие контактного термосопротивления имеет широкое применение в различных областях физики и материаловедения и не ограничивается только наличием границы раздела фаз. Его понимание и изучение является важным для развития новых технологий и улучшения существующих методов измерения физических параметров материалов, а на практике введение понятия температурного скачка на границе двух слоев имеет некоторые преимущества, т.к. его величина может быть легко определена экспериментально путем линейной экстраполяции температурного распределения в многослойном теле [13].

Наиболее просто контактное сопротивление находят в экспериментах по методу стационарного теплового потока, хотя в ряде случаев его можно оценить аналитически с помощью теоретического анализа модельных контактов [13, 14].

В целях снижения энергоемкости валового внутреннего продукта повысился интерес к рациональному потреблению тепловой энергии. Для этого в энергосберегающей программе [16] предусмотрено повышение теплозащитных характеристик внешних ограждающих конструкций [17, 18] общественных, жилых и промышленных зданий.

Подбор соответствующих теплоизоляционных покрытий [19] в качестве ограждающих конструкций осуществляют с учетом таких факторов, как температурно-влажностный режим окружающей среды, физические свойства текстильного материала, включая его влаго– и воздухопроницаемость, а также термическое сопротивление [20–22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ограждающие конструкции в виде пакета, состоящие из текстильных полотен, находятся под воздействием воздушного потока, направленного перпендикулярно поверхности обдува.

В работе представлены результаты исследования теплозащитных характеристик текстильных пакетов, обдуваемых потоком воздуха со скоростью, направленной по нормали к их поверхности.

На рис. 1 представлена схема, состоящая из n-го числа слоев текстильных полотен, находящихся под воздействием постоянного потока теплоносителя. В рассматриваемую модель входят следующие слои: первый – внутренний, расположенный у непроницаемой поверхности; последующий *i*-й и внешний *n*-й слой с окружающей средой – пакет материалов при $x > x_{n+1,1}$. Слои пакета из текстильных полотен имеют толщины материала δ_{i2} и воздушной прослойки δ_{i1}; вектор плотности теплового потока $\vec{q}$ на непроницаемой поверхности ($x = x_{11}+0$) численно равен q в направлении оси *x*, скорость потока $\vec{w}_{\infty}$ воздуха, воздействующего на пакет; температуры на внутренней поверхности слоя, а также на поверхности текстильных полотен, находящихся внутри него и на поверхности самого пакета, обозначены, соответственно, t_{i1}, t_{i2} и $t_{n+1,1}$. Поток воздуха противоположно направлен к тепловому потоку. Скорость воздуха,

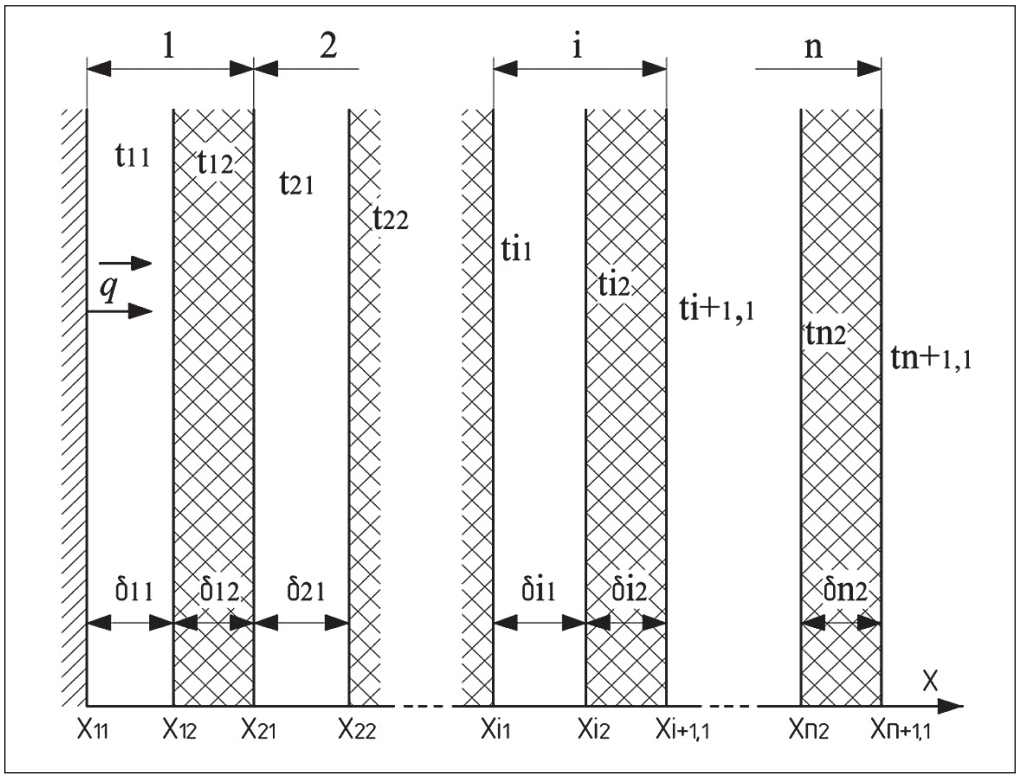


Рис. 1. Схема теплоизоляционных слоев пакета

прошедшего сквозь *i*-й слой, является заданной и постоянной внутри него [22]. Из-за незначительной толщины прослойки воздуха нормаль к поверхности компоненты скорости потока теплоносителя в зазоре представим рядом Тейлора

$$w_i(x) = w_i - m_i \cdot (x_{i2} - x), \quad (1)$$

где $m_i = (w_i - w_{i-1})/\delta_{i1}$.

На рис. 2 приведен график скорости через слои текстильных полотен, образующих пакет.

С помощью граничных условий учитывается перенос тепла за счет излучения в воздушном зазоре между слоями материала. Согласно источнику [23], тепловой перенос определяется добавлением в уравнение энергии эффективного коэффициента теплопроводности, осуществляющего перенос тепла за счет теплопроводности воздуха в материале и радиации.

Тепловой поток, воздействующий на модель, рассматривается одномерным, согласно рис. 1, слева направо тепло переносится за счет излучения и теплопроводности, а справа налево только конвекцией. В условиях одномерной задачи, когда выполняются следующие условия $w_x = -w$, $w_y = w_z = 0$, $d_t/d_x = f(x)$, $d_t/d_y = d_t/d_z = 0$ для *i*-й прослойки можно записать уравнение энергии в дифференциальной форме, которое примет следующий вид:

$$\lambda_{i1}\left[\frac{d^2 t_{i1}(x)}{dx^2}\right] = -c_{i1} \cdot \rho_{i1} \cdot w_i(x)\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]. \quad (2)$$

Между *i*-м и (*i*-1)-м слоями в пакете из текстильных полотен граничные условия соблюдают равенство тепловых потоков и температур на их границе:

$$t_{i1}(x_{i1}) = t_{i1}, \quad (3)$$

$$x_i = \lambda_{i1}^{э}\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]_{x_{i1}} + \alpha_{i1} \cdot (t_{i1} - t_{i2}), \quad (4)$$

где

$$x_i = \lambda_{i-1,2}^{э}\left[\frac{dt_{i-1,2}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}}, \quad (5)$$

$$\alpha_i = c_0 \cdot \varepsilon_i^{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{i1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{i2}}{100}\right)^4\right]/(t_{i1} - t_{i2}). \quad (6)$$

При рассмотрении границы между *i*-м и (*i*-1)-го слоев, величина x_i является их кондуктивным потоком тепла, а α_i – коэффициент теплоотдачи – излучением между слоями рассматриваемого материала *i*-м и (*i*-1)-м в плоской прослойке.

$$\frac{1}{\varepsilon_i^{np}} = \frac{1}{\varepsilon_{i-1,2}} + \frac{1}{\varepsilon_{i2}} - 1. \quad (7)$$

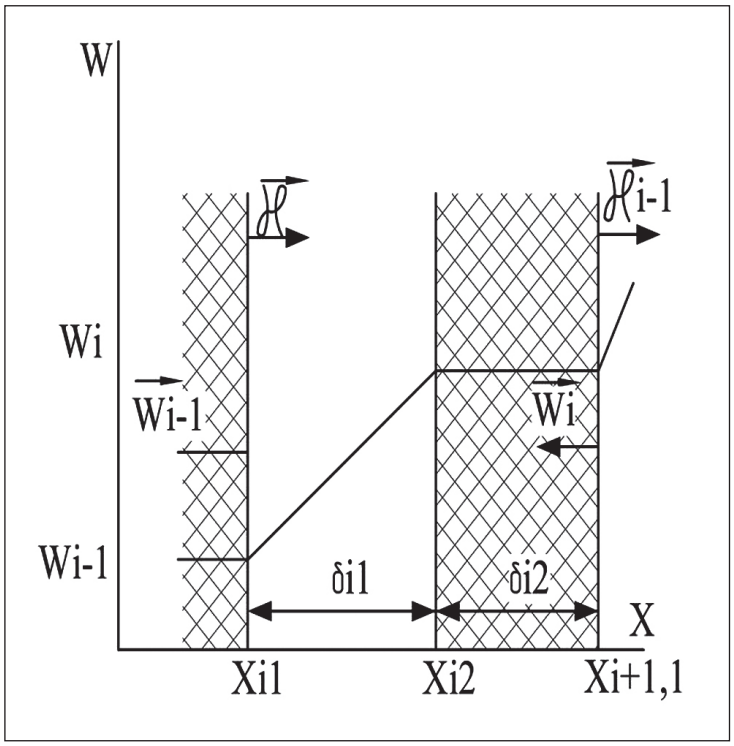


Рис. 2. График скорости через слои текстильных полотен, образующих пакет: w_i – скорость через *i*-й слой потока теплоносителя (воздух); *w*(*x*) – снижение скорости в *i*-м воздушном слое между полотнами текстильного материала *i*-го и (*i*-1); $\vec{x}_i$ – вектор плотности радиционно-кондуктивного потока, проходящий по внутренней поверхности *i*-го слоя пакета

Здесь ε_i^{np}, $\varepsilon_{i-1,2}$, ε_{i2} обозначают приведенные степени поглощательной способности прослойки на границе между (*i*-1)-м и *i*-м слоями рассматриваемого пакета из текстильных полотен; T_i – абсолютная температура, (°K).

Согласно вышеуказанным допущениям, дифференциальная форма уравнения энергии для *i*-го слоя материала будет аналогична форме уравнения пористого слоя [24]:

$$\lambda_{i2}^{э}\left[\frac{d^2 t_{i2}(x)}{dx^2}\right] = -c_{i1}\cdot\rho_{i1}\cdot w_i\left[\frac{dt_{i2}(x)}{dx}\right]. \quad (8)$$

Между рассматриваемым материалом, находящимся в составе пакета и воздушной прослойкой *i*-го слоя, граничные условия характеризуют равенство потоков тепла и температур:

$$t_{i2}(x_{i2}) = t_{i2}, \quad (9)$$

$$-\lambda_{i1}\left[\frac{dt_{i1}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}} + \alpha_i\cdot(t_{i1}-t_{i2}) = -\lambda_{i2}^{э}\left[\frac{dt_{i2}(x)}{dx}\right]_{x_{i2}}. \quad (10)$$

Уравнения (2) и (8) относятся к линейным дифференциальным уравнениям 2-го порядка, но в последнем присутствуют постоянные коэффициенты, их решения можно представить в виде:

$$t_{i1}(x) = t_{i1} - \frac{D_i(y'-y'_{i1})}{\alpha_i[\exp(-y_{i1}^2)+D_i(y'_{i2}-y'_{i1})]}, \quad (11)$$

$$t_{i1}(x) = t_{i2} - \frac{\chi_i\alpha_{i2}[\exp(-y_{i2}^2)+D_i(y'_{i2}-y'_{i1})]}{\lambda_{i2}^{э}w_i[\exp(-y_{i1}^2)+D_i(y'_{i2}-y'_{i1})]}\cdot$$
$$\cdot\left\{1-\exp\left[-\frac{w_i\cdot(x-x_{i2})}{a_{i2}}\right]\right\}, \quad (12)$$

$$y' = 2\pi^{-0,5}\int_0^y \exp\left(-y^2\right)dy, \quad (13)$$

где $D_i = [\pi\alpha^2/(2\lambda_{i1}\cdot c_{i1}\cdot\rho_{i1}\cdot m_i]^{0,5}$; переменная $y = w_i(x)/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$, причем между слоями $y_{i1} = w_{i-1}/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$ и $y_{i2} = w_i/\sqrt{2m_i\cdot a_{i1}}$; a_{i1} – коэффициент температуропроводности в воздушной прослойке $a_{i1} = \lambda_{i2}^{э}/(c_{i1}\cdot\rho_{i1})$; значения интеграла y' принимаются согласно [25]. Величина χ_{i+1} находится по рекуррентной формуле при условии, что $\chi_i = q$:

$$\chi_{i+1} = \chi_i\cdot\frac{\exp(-y_{i2}^2)+D_i(y'_{i2}-y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2)+D_i(y'_{i2}-y'_{i1})}\cdot$$
$$\cdot\exp\left(-\frac{w_i\cdot\delta_{i2}}{a_{i2}}\right). \quad (14)$$

При помощи уравнений (11) и (12) можно определить температурный перепад Δt на границах воздушной прослойки или материала. Согласно формуле $R = \Delta t/q$ термическое сопротивление можно представить в виде:

$$R_{i1} = \frac{\chi_i}{q \cdot \alpha_i} \cdot \frac{D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}, \quad (15)$$

$$R_{i2} = \frac{\chi_i \cdot a_{i2}}{q \cdot w_i \cdot \lambda_{i2}^{э}} \cdot \frac{\exp(-y_{i2}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})}{\exp(-y_{i1}^2) + D_i(y'_{i2} - y'_{i1})} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right)\right]. \quad (16)$$

Термическое сопротивление теплоотдаче от наружной поверхности пакета из текстильных полотен к окружающей среде можно вычислить по формуле $R_{n+1} = \chi_{i+1} \cdot [q(\alpha_p + \alpha_k)]^{-1}$, откуда коэффициент теплоотдачи можно найти согласно уравнению (6) при замене $T_{n+1,2}$ и $t_{n+1,2}$ на температуры окружающей среды, а затем вместо $\varepsilon_i^{пр}$ подставить степень поглощательной способности наружного материала ε_{n2}, входящего в рассматриваемый пакет. Согласно формуле Г.Н. Кружилина [22], можно рассчитать коэффициент конвективной теплоотдачи для лобовой точки обдува:

$$Nu = 1{,}04 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}5} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}.$$

Термическое сопротивление всего пакета, состоящего из текстильных полотен, определяется из суммы термических сопротивлений отдельных материалов, входящих в его состав, воздушных прослоек и термического сопротивления теплоотдачи к окружающей среде.

Далее разберем предельные переходы в полученных формулах. В слоях, где скорости воздуха незначительны, т.е. когда $y_{i1}y_{i2} < 0{,}02$ и $w_i\delta_{i2}/a_{i2} < 0{,}1$, можно разложить выражения (14–16) в ряд, и тогда с ошибкой не более 1% в виде $w_i\delta_{i2}/a_{i2} < 0{,}1$, после этого формулы (14), (15) и (16) упрощаются за счет разложения в ряд при ошибке не более 1%, тогда уравнение для расчета соответствующего термического сопротивления примет вид:

$$R_{i1} = \frac{\chi_i}{q} \cdot \frac{1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})}{\frac{\lambda_{i1}}{\delta_{i1}} + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]}, \quad (17)$$

$$R_{i2} = \frac{\chi_i \cdot \delta_{i2}}{q \cdot \lambda_{i2}^{э}} \cdot \frac{\left(1 - y_{i2}^2 - y_{i1}^2\right) + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]}{1 + [1 - 2y_{i1}(y_{i2} - y_{i1})]} \cdot \left[1 - \frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right], \quad (18)$$

$$\chi_{i+1} = \chi_i \cdot \left[1 - y_{i2}^2 - y_{i1}^2 - \frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}} + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{w_i \cdot \delta_{i2}}{a_{i2}}\right)^2\right]. \quad (19)$$

Возможны два предельных перехода, первый осуществляется при $w_i \to 0$. Тогда из уравнений (14)–(19) можно вывести следующие зависимости, описывающие теплопередачу во время отсутствия обдува:

$$\chi_i = q,\ R_{i1} = 1/(\alpha_i + \lambda_{i1}/\delta_{i1}),\ R_{i2} = \delta_{i2}/\lambda_{i2}^{э}. \quad (20)$$

Второй предельный переход происходит при высоких скоростях потока воздуха. При условии, что i-й материал, входящий в пакет, обладает высокой воздухопроницаемостью $w_i\delta_i/a_i > 5$, согласно уравнению (14), можно записать $\chi_{i+1} = 0$ с ошибкой не более 1%. Термические сопротивления (i+1)-го слоя и последующих слоев с более высоким номером приобретают значение, равное нулю, а температуры в этих слоях приобретут тождественность температурам окружающей среды, что соответствует кривой 5 на рис. 3. При таких условиях теплозащитные механизмы материалов сводятся к ветрозащитным, и поэтому становится ясной целесообразность использования ветрозащитного слоя. Таким примером могут служить строительные конструкции. Использование в защите слоя с низкой воздухопроницаемостью способствует эффективному выполнению теплозащитных функций другими слоями пакета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для применения расчета термических сопротивлений к строительным объектам следует определить воздухопроницаемость отдельных слоев [26, 27], входящих в состав пакета в условиях воздействия потока окружающей среды, а также определить закономерности изменения толщины воздушных прослоек. Поскольку эти величины неизвестны, ограничимся зависимостями воздухопроницаемости от теплозащитных свойств теплоизоляционного пакета. Для решения поставленной задачи воспользуемся предположением о том, что скорость потока среды в i-й прослойке пропорциональна ее воздухопроницаемости и динамическому напору воздушного потока среды, задержанного материалом в пакете:

$$w_i = b_{hi} \cdot \rho_i(w_{i+1}{}^2 - w_i^2)/2h_i, \quad (21)$$

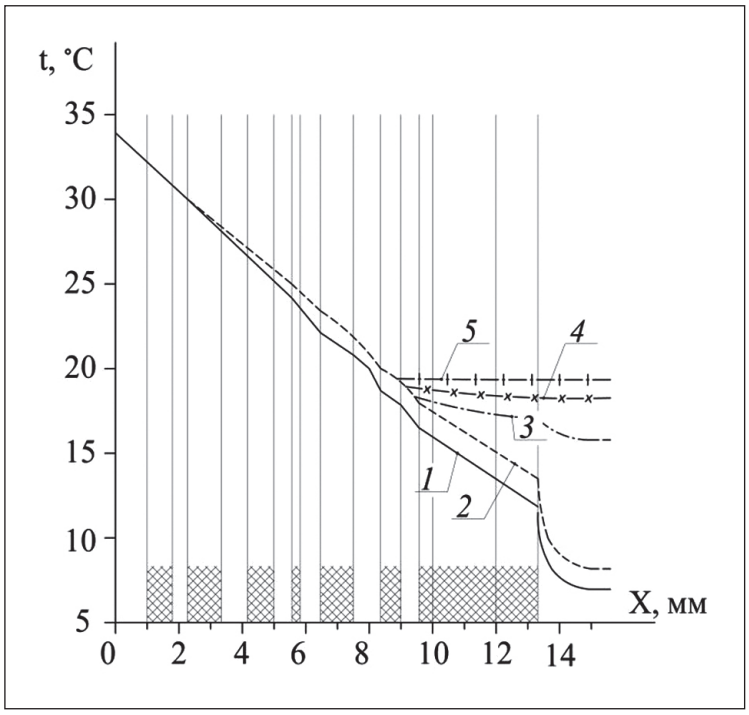


Рис. 3. Схема расположения температурных кривых, полученных расчетным путем:
1 – $w_{\infty} = 0$, $a_i = 0$; 2 – $w_{\infty} = 0$, $a_i \neq 0$;
3 – $w_{\infty} = 4$ м/с, $a_i \neq 0$; 4 –$w_{\infty} = 10$ м/с, $a_i \neq 0$;
5 – $w_{\infty} = 20$ м/с, $a_i \neq 0$

где h_i – перепад давления, который определялся при воздухопроницаемостиb_{hi}.

Подобная формула использовалась П.А. Колесниковым [28], но изменение толщины прослоек во время расчетов учтено не было. На рис. 3 приведена схема расположения температурных кривых за ее пределами, они показаны условно. При расчете использовали метод последовательных приближений. За исходное распределение температур были приняты температурные кривые при условии, когда воздух считался неподвижным, а теплообмен за счет излучения в воздушной прослойке отсутствовал.

Согласно схеме на рис. 3, на снижение термического сопротивления пакета влияет рост скорости обдува. По ходу кривых можно проследить оба описанных ранее предельных случая. Как видно из схемы, во внутренних слоях исследуемого пакета температурные кривые практически совпадают, это явление прослеживается из-за малой скорости воздушного потока. Также кривая 5 свидетельствует о том, что с увеличением скорости обдува падает термическое сопротивление на наружной поверхности пакета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– В работе рассмотрен нестандартный подход, и приведены уравнения для расчета термических сопротивлений как отдельных слоев, так и теплоизоляционного пакета в целом, в условиях обдува потоком воздуха лобовой точки.
– Установлено, что при реальных испытаниях теплозащитного пакета толщина воздушных прослоек будет снижаться, а проникновение холодного потока в материал будет значительно глубже.
– Показано, что рассмотренный подход более достоверно отражает основные закономерности теплопередачи через теплозащитный пакет в условиях обдува окружающей средой, тем самым приводя усложненное решение задачи к более простому изучению воздухопроницаемости и деформации слоев пакета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ананьев А.И., Хоров О.А, Евсеев Л.Д. и др. Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций. *Строительный эксперт.* 2005;16(203):17-23.
2. Киселев И.Я. Теплоперенос через волокнистые и ячеистые эффективные теплоизоляционные материалы. Строительная физика в 21 веке. М.: НИИ СФ, 2006. 58-65.

3. Богословский В.К., Гагарин В.Г. Влагоперенос в материалах ограждающих конструкций. Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. 2. М.: Минстрой РФ, 1995. 50-53.
4. Богословский В.Н., Гагарин В.Г., Могутов В.А. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций. В: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. 2. Москва: Минстрой РФ; 1995. 460-462.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика: теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. СПб: АВОК Северо-Запад; 2006. 399.
6. Гагарин В.Г. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. *Строительные материалы*. 2010;12:4-12. – EDN: NQTZMT
7. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий. *Academia. Архитектура и строительство*. 2009;5:297-305. – EDN: MTPDUP
8. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. М: Высшая школа; 1982. 304.
9. Киселев И.Я. Теплопроводность эффективных теплоизоляционных строительных материалов и изделий. *Academia*. 2004;4:36-41.
10. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Атомиздат; 1970. 416.
11. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. М: Энергия; 1978. 480.
12. Малявина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие. М: АВОК-ПРЕСС; 2007. 144.
13. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М: Энергия; 1977. 327.
14. Попов ВМ. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М: Энергия; 1971. 216. – EDN: RELYGR
15. Иванов В.В., Видин Ю.В., Колесник В.А. Процессы прогрева многослойных тел лучисто-конвективным теплом. Ростов н/Д: Изд. Рост. ун-та; 1990. 159.
16. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности. Available at: https://www.audar-info.ru/na/editSection/index/type_id/3/doc_id/5265/release_id/18634/ (дата обращения: 01.09.2022).
17. Тепловая защита зданий. Available at: http://sniprf.ru/sp50-13330-2012 (дата обращения: 08.09.2022).
18. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных наноматериалов на основе аэрогелей. *Нанотехнологии в строительстве*. 2019;11(4):462-477. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477 – EDN: UJZLCI
19. Шарпар Н.М. Разработка методов исследования теплофизических свойств нетканых материалов. Диссертация кандидата технических наук: 05.19.01. Московский государственный университет дизайна и технологии; Москва, 2013. 135. – EDN: SUWQHL
20. Строительная климатология. Available at: https://docs.cntd.ru/document/573659358 (дата обращения: 10.09.2022).
21. Проектирование тепловой защиты зданий. Available at: https://www.dokipedia.ru/document/1724245 (дата обращения: 15.09.2022).
22. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М: Энергия; 1975. 488.
23. Дульнев Г.Н., Заричняк ЮП. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л: Энергия; 1974. 264.
24. Корнюхин И.П. Тепломассообмен в теплотехнике текстильных производств: Учебное пособие для вузов. М: МГТУ им. А.Н. Косыгина; 2004. 598.
25. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. Пер. с 6-го перераб. нем. издания Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. 3-е изд. стереотип. М: Наука; 1977. 344.
26. Zhmakin L.I., Osmanov Z.N., Sharpar N.M. Experimental Determination of the Longitudinal Component of the Coefficient of Air Permeability of Textile Materials. *Fibre Chemistry*. 2017 May;49(1):60-63. https://doi.org/10.1007/s10692-017-9843-5. EDN: XNNYTI
27. Шарпар Н.М., Жмакин Л.И. Экспериментальное определение коэффициента воздухопроницаемости текстильных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2012;6(342):148-151. – EDN: RDUVIF
28. Колесников П.А. Основы проектирования теплозащитной одежды. М: Легкая индустрия; 1971. 109.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарпар Николай Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, sharpar753@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5595-2779

Жмакин Леонид Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, li_zhmakin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4315-2659

Власов Илья Николаевич – аспирант кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, nickolaich99@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-5749-9227

Бокова Елена Сергеевна – доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии полимерных материалов и нанокомпозитов Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина, Москва, esbokova@ya.ru, https://orcid.org/0000-0001-7769-9639

ВКЛАД АВТОРОВ

Шарпар Н.М. – сбор материала, написание статьи, концепция методики, выводы статьи.

Жмакин Л.И. – научное руководство, развитие методологии, написание исходного текста, доработка текста.

Власов И.Н. – аналитический обзор «методик определения термического сопротивления многослойного пакета», сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

Бокова Е.С. – научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2025; принята к публикации 10.02.2025.

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41

CC BY 4.0

Potentiometric method for determination of hydraulic activity of quartz-containing powders

Maria A. Frolova[1], Valery S. Lesovik[2], Marina V. Morozova[1]*, Tatyana N. Orekhova[2]

[1] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
[2] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

* Corresponding author: e-mail: m.morozova@narfu.ru

ABSTRACT

Introduction. An important aspect of concrete mixture preparation technology is the exploration of methods to effectively utilize the properties of aggregates (fillers) in hardening multi-component systems. The most common binder composition is a mixture of a binder system with crushed quartz-containing polymineral sand. It is known that micro silica is classified as an active mineral additive (filler), the properties of which are characterized by the amount of Ca^{2+} ions absorbed from a saturated lime solution. Literature sources describe two types of analytical methods for determining pozzolanic activity. The first type that trace the change in the content of $Ca(OH)_2$ over time during the pozzolanic reaction. The second type that aim to determine the physical and mechanical characteristics of the material under study. These characteristics reflect its ability to bind free calcium oxide into stable hydrate compounds. Previously applicability of the potentiometric method of analysis using an ion-selective electrode with pCa-function was demonstrated for the assessment of pozzolanic activity of highly dispersed materials. It should be noted to note that this electrochemical method of analysis which is functionally related to the concentration of the determined component in the tested solution, is very efficient in terms of expressiveness and labour intensity. The objective of the research is to validate the method for micro silica systems obtained by mechanical grinding of raw materials of polymineral sands from different deposits. The experiments were conducted using sands from the Arkhangelsk region deposits. The quartz sand (QS) was chosen as a reference object to establish the nature of change in the functional relationship of the measured potential of the electrode system from the volume of added $Ca(OH)_2$ solution. **Methods and Materials.** The polymineral sand of the Krasnoflotsky-West deposit is categorised as alluvial-marine modern Quaternary sediments (am IV). The sand of the Kholmogorskoye deposit is quartz-feldspathic sand, which belongs to alluvial modern Quaternary sediments (a IV). The mineralogical composition of polymineral sands was determined by means of the semi-quantitative method, utilising the binocular microscope MBS-1. Fine sand powders were obtained by dry mechanical grinding in a Retsch PM100 planetary. The specific surface area of the obtained fine powders was measured by the Kozeny-Karman gas permeability method on a PSKh-10a apparatus. The potentiometric analysis was conducted using an apparatus comprising an electrode pair, consisting of a measuring electrode with pCa-function and a reference electrode connected to an Expert-001-3.0.1 ionometer. The reaction system was stirred using a magnetic stirrer. In order to ascertain the sorption capacity of silica-containing raw materials, a lime solution with a concentration and a suspension of fine sand powders were prepared in advance. Concurrently, the EMF (potential) of the system was measured, with constant stirring. The concentration of calcium ions, C_{act}, was then calculated based on the previously established calibration dependence, using the potential values (mV) obtained. In order to determine the activity of fine mineral powders of silica, the dependence between the values of the given concentration of calcium ions in lime solution when adding a certain volume of lime to the suspension of the studied sands and the concentration values obtained by potentiometric measurements was plotted. **Results and Discussion.** The obtained powders of quartz-containing polymineral sands, which had been finely dispersed, had the following specific surface values: quartz sand – 1020±31 m^2/kg, Krasnoflotsky West – 465±14 m^2/kg and Kholmogorskoye – 450±14 m^2/kg. The given data on the specific surface of powders of natural origin allow for a comparative analysis of experimental potentiometric measurements. Concurrently, the dependence of the measured potential on the concentration of calcium ions in the solution for quartz sand suspension can be utilised as a reference, given the significantly high specific surface of the powder, thereby resulting in a more pronounced dependence $E = f(V_{add})$. Relationship obtained the dependence of the measured potential of the electrode system on the volume of added $Ca(OH)_2$ solution in a suspension of quartz sand (as a reference sample) and distilled water (as an idle experiment) shows that the nature of the change in the functional relationship of the analysed two samples (QS and H_2O) is different. Concurrently, it can be observed that the incorporation of a lime solution into water (in accordance with the anticipated outcome) results in a nearly constant augmentation in the measured potential values, the magnitude of which is proportional to $-lgC_{Ca}$. Change of potential of electrode pair in suspension of quartz sand powder has character different from that mentioned above for water. This functional dependency can be divided into three periods. The initial period is characterised by an induction phase, during which the electrode potential displays a linear increase in

© Frolova M.A., Lesovik V.S., Morozova M.V., Orekhova T.N., 2025

accordance with the rising concentration of $Ca(OH)_2$ within the solution. The presence of a second period of functional dependence, where stabilisation of potential values is observed when calcium hydroxide is added to the reaction system, is directly related to the adsorption (pozzolanic) effect of finely dispersed quartz. The third and final period is characterised by the growth of the electrode potential value due to the appearance of excess Ca^{2+} ions in the solution. The data presented demonstrate that the powder from the Krasnoflotsky-West deposit exhibits the highest pozzolanic and adsorption activity in relation to calcium ions. The dependence has a pronounced three-stage character, as determined by us through conducting a similar experiment with quartz sand powder. Given that quartz-containing powders with high dispersion exhibit sorbent properties discrepancy in the dependencies may signify a quantitative variation in the active adsorption centres of the studied powders, consequently resulting in a disparity in their degree of filling. This fact is a kinetic factor in the process of solid-phase concentration of the determined cations. The results obtained demonstrated that the sorption capacity of calcium oxide in the powders of the studied sand deposits was practically equivalent. However, the character of the functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value was different. This observation suggests the potential for distinct mechanisms underlying the sorption processes. **Conclusion.** The paper demonstrates that the potentiometric method of determining the sorption capacity of calcium oxide can be used as an express method for powders of quartz-containing polymineral sands. It is demonstrated that to accurately calculate the specified parameters under experimental conditions that ensure full reproducibility, it is essential to conduct an experiment using a suspension of quartz sand (as a reference sample) alongside a comparative experiment in which the dissolution water serves as the measurement object. The functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value can be used for comparative evaluation of the mechanism of sorption processes for powders of different material nature.

KEYWORDS: polymineral quartz sand, pozzolanic activity, calcium oxide, calcium hydroxide concentration, sorption capacity

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

FOR CITATION:
Frolova M.A., Lesovik V.S., Morozova M.V., Orekhova T.N. Potentiometric method for determination of hydraulic activity of quartz-containing powders. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41. – EDN: WPDJVA.

INTRODUCTION

In the domain of concrete mix preparation, a significant concern pertains to the exploration of methodologies for the effective utilization of the properties of aggregates (fillers) in multi-component systems [1]. It has been established that the most prevalent binder composition consists of a mixture of binder systems with minor (filler) fractions of natural and (or) man-made materials. Historically, crushed quartz-containing polymineral sands have been employed as fillers in concrete mixtures derived from natural materials. In such instances, it is imperative that the degree of silica fines does not decrease below the level commensurate with the particle size of the binder. Under these conditions, the filler grains will be encircled by cement hydration products, thereby accelerating the hydration process of cement grains. Consequently, the gel phase will compact and crystallize more intensively on the surface of the filler grains. Furthermore, in certain instances, the presence of the filler can exert a modifying influence on the hydration products of the cement grains, thereby contributing to the development of crystalline neoplasms.

As stated in [2], micro silica (finely ground quartz-containing sand) is classified as an active mineral additive (filler), the properties of which are characterized by the amount of Ca^{2+} ions absorbed from a saturated lime solution.

Literature sources describe two types of analytical methods for determining pozzolanic activity. The first type are direct methods that trace the change in the content of $Ca(OH)_2$ over time during the pozzolanic reaction. The second type are indirect methods that aim to determine the physical and mechanical characteristics of the material under study. These characteristics reflect its ability to bind free calcium oxide into stable hydrate compounds [3–7]. In [8], the applicability of the potentiometric method of analysis using an ion-selective electrode with pCa-function was demonstrated for the assessment of pozzolanic activity of highly dispersed materials. This was achieved through the use of clay soil models with different plasticity numbers as an exemplar. It is important to note that this electrochemical method of analysis, based on the measurement of the electrode potential, which is functionally related to the concentration of the determined component in the tested solution, is very efficient in terms of expressiveness and labour intensity. The objective of the research presented in this paper is to validate the method for micro silica systems obtained by mechanical grinding of raw materials of polymineral sands from different deposits. The experiments were conducted using sands from the Arkhangelsk region deposits (Fig. 1):

Fig. 1. Deposits of polymineral sands in the Arkhangelsk region: 1 – Krasnoflotsky-West deposit (KW); 2 – Kholmogorskoye deposit (Kh)

Krasnoflotsky-West (KW) and Kholmogorskoye (Kh) [9, 10]. The quartz sand (QS) (Volsky monofractional sand according to GOST 6139-2003), fraction 0.1–0.2 mm, containing not less than 98% SiO_2 and density 2610 kg/m^3 was chosen as a reference object to establish the nature of change in the functional relationship of the measured potential of the electrode system from the volume of added $Ca(OH)_2$ solution.

METHODS AND MATERIALS

The polymineral sand of the Krasnoflotsky-West deposit is categorized as alluvial-marine modern Quaternary sediments (am IV). The name of the deposit is predicated on its territorial affiliation, specifically the shoreline of Krasnoflotsky Island. The modulus of coarseness, M_k, is 1.7, which corresponds to the classification of fine sand. The true density of the sand is measured at 2710 kg/m^3.

The sand of the Kholmogorskoye deposit is quartz-feldspathic sand, which belongs to alluvial modern Quaternary sediments (a IV). The sand deposit is located within 2 km of Kholmogory village. The modulus of coarseness, M_k, is 1.5, which corresponds to the classification of fine sand. The true density of the sand is 2230 kg/m^3.

The elemental composition of the experimental samples in terms of oxides is presented in Table 1.

The mineralogical composition of polymineral sands was determined by means of the semi-quantitative method, utilizing the binocular microscope MBS-1. The results of the mineralogical analysis are presented in Table 2.

Fine sand powders were obtained by dry mechanical grinding in a Retsch PM100 planetary ball mill (rotor speed 420 rpm) for 40 minutes. The specific surface area of the obtained fine powders was measured by the Kozeny-Karman gas permeability method on a PSKh-10a apparatus.

The potentiometric analysis was conducted using an apparatus comprising an electrode pair, consisting of

Table 1. The elemental composition (%) of the polymineral sands [11]

Sample	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	l.a.i.*
KW	91.35	5.06	0.74	0.65	0.26	0.36	1.37	0.21
Kh	77.48	12.13	1.80	1.61	1.45	2.09	2.76	0.68

* loss after ignition

Table 2. The results of the mineralogical analysis of sands

Sample	Description
KW	The fine-grained sand is light grey with a brown tinge, consisting of rounded and angular grains (grains of sand) of various minerals and rocks. The mineral composition is dominated by quartz (approximately 90%), with a subordinate amount of grey and pink feldspars (5–7%), ore opaque minerals of black and dark brown colour, garnets, and fragments of rocks (granite-gneisses, quartzites).
Kh	The fine-grained sand is light grey with a brown tinge, consisting of rounded and angular grains (grains of sand) of various minerals and rocks. The mineral composition is dominated by quartz (approximately 80%), with subordinate amounts of grey and pink feldspars (5–8%), ore opaque minerals of black and dark brown colour, garnets, magnetite, mica, and fragments of rocks (granite-gneisses, quartzites).

a measuring electrode with pCa-function and a reference electrode connected to an Expert-001-3.0.1 ionometer. The electrode pair was immersed in a glass beaker with a capacity of 100 ml. The reaction system was stirred using a magnetic stirrer. The experiments were conducted at a temperature of 20 ± 2 °C. Prior to the commencement of the experiment, the calcium-selective electrode XC-Ca-001 was subjected to an incubation period of three days in a 0.01 mol/l calcium chloride solution. Thereafter, the electrode was meticulously rinsed with distilled water to ensure the establishment of a stable and minimal electrical signal (electrode potential). The calibration of the electrode was then undertaken using standard calcium chloride solutions (prepared in advance) with concentrations (C_{Ca}) ranging from 10^{-1} to 10^{-5} mol/l. It is acknowledged that the EMF exhibited by the mounted electrode pair is governed by the classical equation (under the assumption that the activity coefficient of Ca^{+2} ions for the areas of working concentrations of calcium ions $10^{-2} \div 10^{-4}$ mol/l approximates unity in value) [12]:

$$E = E_0 + \frac{2{,}303RT}{nF} lgC_{Ca} = E_0 - a \cdot pCa, \quad (1)$$

where E and E_0 – measured EMF value and standard, constant value (depends on solution temperature), *mV*, respectively;

R – universal gas constant, 8.314 J/K;

F – Faraday constant, 96500 C/mol;

$n = 2$ – number of electrons involved in an electrode reaction is usually numerically equal to the charge of the ion;

$a = 0.029$ – constant for T=293 K;

$pCa = -lgC_{Ca}$.

In order to ascertain the sorption capacity of silica-containing raw materials, a lime solution with a concentration of 0.015 mol/l (saturated solution at 20 °C) and a suspension of fine sand powders (0.5 g in 80 ml of distilled water) were prepared in advance. To the obtained suspension, the lime solution was added in volumes ranging from 0.2 to 0.8 ml, successively, using a laboratory pipette. Concurrently, the EMF (potential) of the system was measured, with constant stirring. The concentration of calcium ions, C_{act}, was then calculated based on the previously established calibration dependence, using the potential values (mV) obtained.

In order to determine the activity of fine mineral powders of silica, the dependence between the values of the given concentration of calcium ions in lime solution C_{theor} when adding a certain volume of lime to the suspension of the studied sands and the concentration values obtained by potentiometric measurements C_{act} was plotted. The concentration of calcium ions in the lime solution, taking into account dilution of the solution (C_{theor}), was determined by the formula:

$$C_{theor} = C_0 \frac{V_{add}}{V_{total}}, \quad (2)$$

where C_0 – initial concentration of saturated lime solution, 0.015 mol/l;

V_{add} – total volume of added lime solution, ml;

V_{total} – total system volume, (80+V_{add}) ml.

RESULTS AND DISCUSSION

The obtained powders of quartz-containing polymineral sands, which had been finely dispersed, had the following specific surface (S_{spec}, m^2/kg) values: quartz sand – 1020±31, Krasnoflotsky West – 465±14 and Kholmogorskoye – 450±14. It is the opinion of the authors that the given data on the specific surface of powders of natural origin allow for a comparative analysis of experimental potentiometric measurements. Concurrently, the dependence of the measured potential on the concentration of calcium ions in the solution for quartz sand suspension can be utilised as a reference, given the significantly higher S_{spec} of the powder, thereby resulting in a more pronounced dependence $E = f(V_{add})$.

As demonstrated in Figure 2, the calibration dependence $E = f(pCa)$ is characterised by a straight line with a mathematical equation $E = -28.2pCa + 309$ (approximation reliability coefficient $R^2 = 0.99$). The angular coefficient 2.303RT/nF of the experimentally obtained

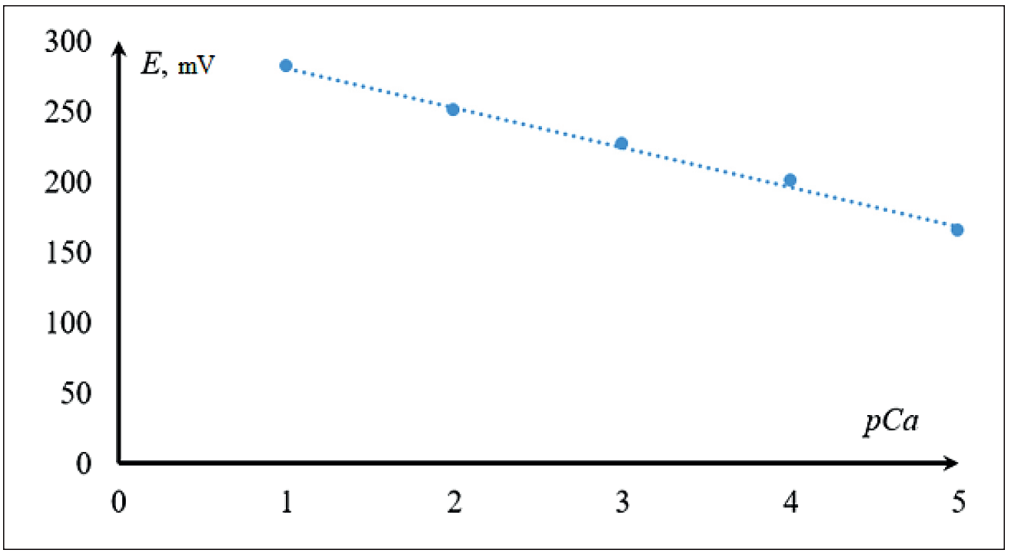


Fig. 2. Calibration curve of the dependence $E = f(pCa)$.

dependence is close to the theoretical one, with a discrepancy between these values of 2.8%. This observation is indicative of the validity of the laboratory setup employed to measure the electrode potential in aqueous lime-containing solutions within the selected range of concentrations of $Ca(OH)_2$.

As demonstrated in Figure 3, the dependence of the measured potential of the electrode system on the volume of added $Ca(OH)_2$ solution in a suspension of quartz sand (as a reference sample) and distilled water (as an idle experiment) shows that the nature of the change in the functional relationship of the analysed two samples (QS and H_2O) is different. This indicates that the used ion-selective electrode is sufficiently sensitive to the level of given concentrations of lime in the solution.

Concurrently, it can be observed that the incorporation of a lime solution into water (in accordance with the anticipated outcome) results in a nearly constant augmentation in the measured potential values, the magnitude of which is proportional to $-lgC_{Ca}$. The initial potential of the electrode pair (prior to the introduction of the lime solution) corresponds to the value of the background concentration of calcium ions in the solution. Consequently, the dependence $E = f(V)$ for an idle experiment (Fig. 3) is described by a polynomial equation of the second degree:

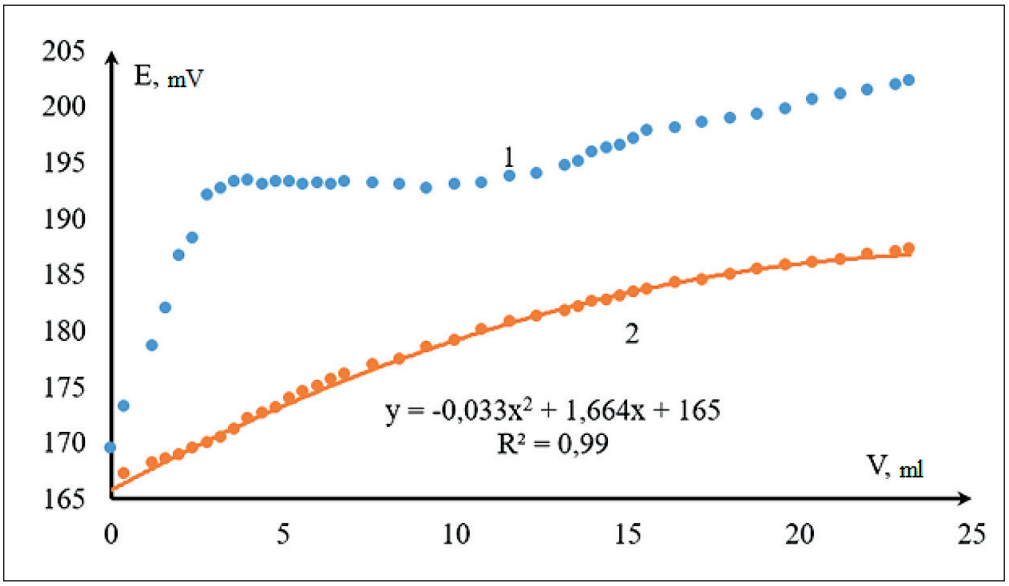


Fig. 3. Potential of an electrode pair when adding a $Ca(OH)_2$ solution: 1 – to a suspension of quartz sand powder; 2 – to distilled water

$$E = -0{,}030V^2 + 1{,}664V + 165. \quad (3)$$

The background concentration of calcium ions in the solution is thus 10^{-5} mol/l. This value is incorporated in the calculations of the current concentration of calcium ions in the reaction medium during the analysis of the experimental results obtained for the studied samples of mineral sands.

The alteration in the electrode pair potential within the silica sand powder suspension exhibits a distinct character compared to that previously observed in water. Consequently, this functional dependence can be subdivided into three periods. The initial period is characterised by an induction phase, during which the electrode potential displays a linear increase in accordance with the rising concentration of $Ca(OH)_2$ within the solution. This phenomenon, it is hypothesised, is attributable to the restructuring of the double electric layer of particles, resulting in the compensation of the negative charge of the quartz surface by positively charged Ca^{2+} ions. The presence of a second period of functional dependence, where stabilisation of potential values is observed when calcium hydroxide is added to the reaction system, is directly related to the adsorption (pozzolanic) effect of finely dispersed quartz. The third and final period is characterised by the growth of the electrode potential value due to the appearance of excess Ca^{2+} ions in the solution.

As illustrated in Figure 4, the functional dependences $C_{fact} = f(C_{theor})$ for the powders of natural sands under

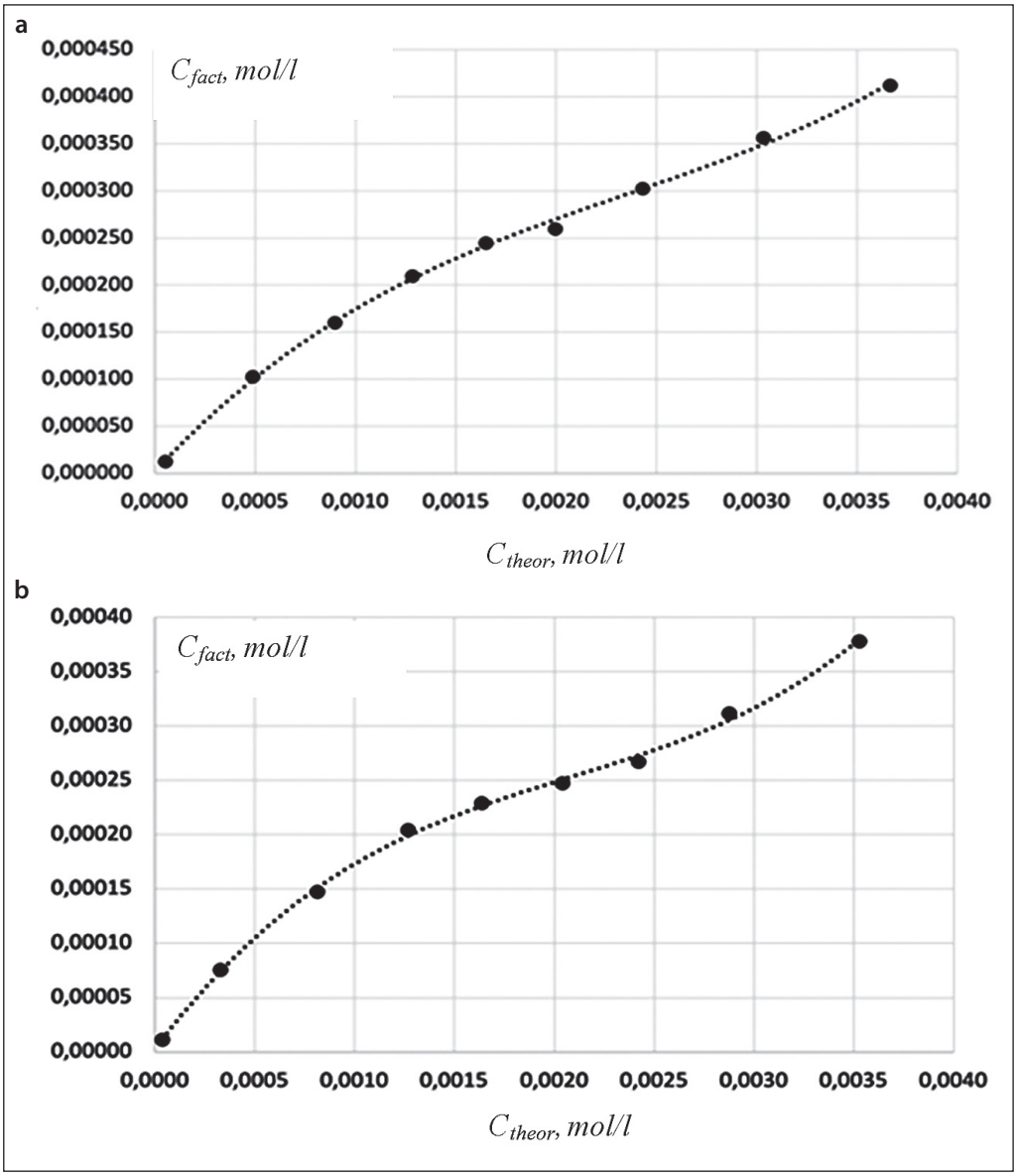


Fig. 4. Concentration dependences $C_{fact} = f(S_{theor})$ for powders: a – "Kholmogorskoye"; b – "Krasnoflotsky Zapad"

Table 3. Characteristics of powder activity

Powder	C_{theor}, mol/l	C_{fact}, mol/l	$\Delta C_{Ca(OH)_2}$, mol/l	$\Delta C_{Ca(OH)_2}$, ml/g	α_{CaO}, ml/g	Γ_a
Kh	$2.50 \cdot 10^{-3}$	$0.29 \cdot 10^{-3}$	$2.21 \cdot 10^{-3}$	26.2	19.83	0.99
KZ		$0.19 \cdot 10^{-3}$	$2.31 \cdot 10^{-3}$	26.6	20.13	1.00

study were calculated from the data of potentiometric measurements.

The data presented demonstrate that the powder from the Krasnoflotsky-West deposit (Fig. 4b) exhibits the highest pozzolanic and adsorption activity in relation to calcium ions. The dependence (Fig. 4b) has a pronounced three-stage character, as determined by us through conducting a similar experiment with quartz sand powder.

It is acknowledged that quartz-containing powders with high dispersion exhibit sorbent properties [13]. The observed discrepancy in the dependencies depicted in Fig. 4 (a and b) may signify a quantitative variation in the active adsorption centres of the studied powders, consequently resulting in a disparity in their degree of filling. This observation, as posited by the authors [13], is a kinetic factor in the process of solid-phase concentration of the determined cations.

The activity parameters of powders were calculated from potentiometric data, as presented in [8]. The absorption capacity of calcium oxide ($\alpha_{CaO} = \Delta C_{CaO} = (\Delta C_{Ca(OH)_2}/M_{Ca(OH)_2}) \cdot M_{CaO}$) and the hydraulic activity coefficient ($H = ln^3\sqrt{\alpha_{CaO}}$) were determined as a characteristic of absorption by the studied quartz-containing disperse systems. The results obtained are presented in Table 3.

The results obtained (Table 3) demonstrated that the sorption capacity of calcium oxide in the powders of the studied sand deposits was practically equivalent. However, the character of the functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value was different. This observation suggests the potential for distinct mechanisms underlying the sorption processes.

CONCLUSION

In conclusion, the following observations can be made:

1. The paper demonstrates that the potentiometric method of determining the sorption capacity of calcium oxide can be used as an express method for powders of quartz-containing polymineral sands.

2. It is demonstrated that for accurate calculation of the determined parameters under conditions of experiments that ensure full reproducibility, it is necessary to carry out an experiment with a suspension of quartz sand (as a reference sample) and a comparison experiment in which dissolution water is used as the object of measurement.

3. The functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value can be used for comparative evaluation of the mechanism of sorption processes for powders of different material nature.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Construction materials. Present and future. *Bulletin of MGSU*. 2017;12(1): 9-16.

2. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E. Classification of active mineral additives for composite binders, taking into account the genesis. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012;(3):10-15.

3. Cepurītis R., Wigum B.J., Garboczi E.J., Mørtsell E., Jacobsen S. Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution. *Cement & Concrete Composites*. 2014;54: 2-16. 2. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.010

4. Donatello M., Tyrer C.R., Cheeseman. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(2):121-127.

5. Pontes J., Santos Silva A., Faria P. Evaluation of Pozzolanic Reactivity of Artificial Pozzolans. *Tech Publications, Switzerland, Materials Science Forum*. 2013;433-438.

6. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov M.S., Urbanov A.V. Methods for determining pozzolanic activity of mineral additives. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2017; 7-8: 29–33.

7. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Khmara N.O., Bukovtsova A.I., Denisova Yu.V. Expanded pearlite sand as an effective additive to astringent. *Building materials*. 2022;6:61-66.

8. Sokolova Yu.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Shinkaruk A.A., Makhova T.A. Potentiometric method for estimating pozzolanic activity of highly dispersed materials. *Nanotechnology in construction*. 2023;15(4):349–358.

9. *Natural raw materials for construction purposes in the North Arctic region. Mineral resource base of the Arkhangelsk region*. Ed. A.M. Ayzenshtadt, A.L. Nevzorova, V.S. Lesovik. Arkhangelsk. C(A)FU. 2011;148.

10. Atlas of the Arkhangelsk Region. *Scientific and Editorial Mapping Part of the GUGK*. Moscow. 1976;72.

11. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of determining the surface activity of dispersed systems based on mineral powders. *Materials Science*. 2021;7:30-36.

12. Summary of physicochemical values. Edition tenth, rev. and add. Ed. A.A. Ravdel and A.M. Ponomareva. St. Petersburg: "Ivan Fedorov". 2003; 240.

13. Syutova E.A., Dzhigola L.A. Study of kinetic regularities of solid-phase concentration of calcium ions by natural sorbents. *Sorption and chromatographic processes*. 2020;20(1):64–78.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Maria A. Frolova – Dr. Sci. (Chem.), associate professor, Head of the Department of materials science, restoration and ecology in construction, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia, m.aizenstadt@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4079-5066

Valery S. Lesovik – Dr. Sci. (Eng.), professor, Head of the Department of construction materials science, products and structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, naukavs@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2378-3947

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

Tatyana N. Orekhova – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, Department of lifting and transport and road vehicles, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, ptdm-bgtu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1849-5681

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Maria A. Frolova – conducting research, collecting, analyzing and processing the results obtained, writing an article.

Valery S. Lesovik – article writing, scientific text editing.

Marina V. Morozova – conducting research, collecting, analyzing and processing the results obtained, writing an article.

Tatyana N. Orekhova – conducting research, collecting, analyzing and processing the results obtained, writing an article.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 06.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Научная статья / Original article
УДК 691.535
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41

CC BY 4.0

Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков

Мария Аркадьевна Фролова[1], **Валерий Станиславович Лесовик**[2], **Марина Владимировна Морозова**[1]*, **Татьяна Николаевна Орехова**[2]

[1] Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия
[2] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: m.morozova@narfu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важным вопросом в технологии приготовления бетонной смеси является поиск путей эффективного использования свойств заполнителей (наполнителей) в твердеющих поликомпонентных системах. Самой распространенной вяжущей композицией является смесь вяжущей системы с измельченным кварцсодержащим полиминеральным песком. Известно, что микрокремнезем относится к активным минеральным добавкам (наполнителям), свойства которых принято характеризовать по количеству поглощенных из насыщенного известкового раствора ионов Ca^{2+}. Сейчас известны прямые аналитические методы определения пуццолановой активности, которые отслеживают изменение содержания $Ca(OH)_2$ во времени в ходе протекания пуццолановой реакции, и косвенные, которые направлены на определение физико-механических характеристик, отражающих способность исследуемого материала связывать свободный оксид кальция в устойчивые гидратные соединения. Ранее была подтверждена применимость потенциометрического метода анализа с использованием ион-селективного электрода с pCa-функцией для оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов. Следует отметить, что этот метод, функционально связанный с концентрацией определяемого компонента в испытуемом растворе, являются весьма эффективным с точки зрения экспрессности и трудоемкости. Поэтому целью исследований является апробация метода для микрокремнеземных систем, полученных способом механического помола полиминеральных песков различных месторождений. Для выполнения экспериментов были использованы пески месторождений Архангельской области. В качестве эталонного объекта для установления характера изменения функциональной взаимосвязи измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ был выбран кварцевый песок (КП). **Методы и материалы.** Полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» относится к аллювиально-морским современным четвертичным отложениям (am IV). Песок месторождения «Холмогорское» – это кварцево-полевошпатовый песок, который относится к аллювиальным современным четвертичным отложениям (a IV). Минералогический состав полиминеральных песков определен полуколичественным методом с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1. Тонкодисперсные порошки песков получали методом сухого механического помола на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100. Удельную поверхность порошков определяли методом газопроницаемости Козени-Кармана на установке ПСХ-10а. Для проведения потенциометрического анализа была собрана установка, представляющая собой электродную пару из измерительного электрода с pCa-функцией и электрода сравнения, подключенных к иономеру Эксперт-001-3.0.1 и погруженных в стеклянный стаканчик вместимостью 100 мл. Перемешивание реакционной системы осуществлялось с помощью магнитной мешалки. Калибровку электрода проводили по стандартным растворам хлорида кальция с разной концентрацией. Для определения сорбционной способности кремнеземсодержащего сырья предварительно готовили раствор извести и суспензию из проб тонкодисперсных порошков песков. В полученную суспензию последовательно добавляли известковый раствор и проводили измерение ЭДС (потенциал) системы при постоянном перемешивании. Далее рассчитывали концентрацию ионов кальция $C_ф$ по предварительно установленной калибровочной зависимости. Для определения активности строили зависимость между значениями задаваемой концентрации ионов кальция в растворе извести при добавлении ее определенного объема в суспензию исследуемых песков и значениями концентрации, полученными потенциометрическими измерениями. **Результаты и обсуждение.** Полученные тонкодисперсные порошки кварцсодержащих полиминеральных песков имели следующие значения удельной поверхности: кварцевый песок – 1020±31 м^2/кг, Краснофлотский Запад» – 465±14 и «Холмогорское» – 450±14 м^2/кг. Приведенные данные позволяют проводить сравнительный анализ экспериментальных потенциометрических измерений. Вместе с тем зависимость измеряемого потенциала от концентрации ионов кальция в растворе для суспензии кварцевого песка может быть использована в качестве некоторого эталона в связи с значительно более высокой удельной поверхностью порошка, а следовательно, более ярко выраженной зависимостью $E = f(V_{доб})$. Полученная зависимость измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ в суспензию кварцевого песка

(в качестве эталонного образца) и дистиллированную воду (в качестве холостого опыта) показали, что характер изменения функциональной взаимосвязи анализируемых двух образцов (КП и H_2O) различен, что свидетельствует о достаточной чувствительности используемого ион-селективного электрода к уровню задаваемых концентраций извести в растворе. Вместе с тем, можно отметить, что добавление раствора извести в воду приводит к практически постоянному росту значений измеряемого потенциала, величина которого пропорциональна $-lgC_{Ca}$, при этом начальный потенциал электродной пары (до ввода раствора извести) соответствует значению фоновой концентрации ионов кальция в растворе. Изменение потенциала электродной пары в суспензии порошка кварцевого песка имеет характер, отличный от вышеотмеченного для воды. Данную функциональную зависимость можно разделить на три периода. Первый – индукционный период, когда электродный потенциал линейно возрастает с увеличением концентрации $Ca(OH)_2$ в растворе. Наличие второго периода функциональной зависимости, на котором наблюдается стабилизация значений потенциала при добавлении в реакционную систему гидроксида кальция, связан непосредственно с адсорбционным (пуццолановым) эффектом тонкодисперсного кварца. Третий заключительный период характеризуется ростом величины потенциала электродов за счет появления избытка ионов Ca^{2+} в растворе. Полученные данные показывают, что наибольшую пуццолановую и адсорбционною активность по отношению к ионам кальция проявляет порошок месторождения «Краснофлотский Запад». Такая зависимость имеет ярко выраженный трехстадийный характер, фиксируемый нами при проведении аналогичного эксперимента с порошком кварцевого песка. Учитывая, что высокодисперсные кварцсодержащие порошки проявляют свойства сорбентов, разница в зависимостях может указывать также на количественное отличие в активных центрах адсорбции у исследуемых порошков и, как следствие, на разницу в их степени заполнения. Данный факт является кинетическим фактором процесса твердофазного концентрирования определяемых катионов. Используя алгоритм расчета параметров активности порошков по данным потенциометрии, были определены емкость поглощения оксида кальция и коэффициент гидравлической активности. Полученные результаты показали, что сорбционная емкость по отношению к оксиду кальция у полученных порошков исследуемых месторождений песков практически одинакова, однако характер функциональной зависимости изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения различается. Данные факт может свидетельствовать о разном механизме сорбционных процессов. **Заключение.** Показано, что потенциометрический метод определения сорбционной емкости по отношению к оксиду кальция может быть использован в качестве экспресс-способа для порошков кварцсодержащих полиминеральных песков. Для корректного расчета определяемых параметров при полностью повторяющихся условиях опытов необходимо проведение эксперимента с суспензией кварцевого песка и эксперимента сравнения, в котором в качестве объекта измерений используется вода растворения. Функциональную зависимость изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения можно использовать для сравнительной оценки механизма сорбционных процессов для порошков различной вещественной природы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полиминеральный кварцевый песок, пуццолановая активность, оксид кальция, концентрация гидроксида кальция, сорбционная емкость

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Фролова М.А., Лесовик В.С., Морозова М.В., Орехова Т.Н. Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-3-41. – EDN: WPDJVA.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья / Original article
УДК 691.535
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41

CC BY 4.0

Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков

Мария Аркадьевна Фролова[1], **Валерий Станиславович Лесовик**[2], **Марина Владимировна Морозова**[1]*, **Татьяна Николаевна Орехова**[2]

[1] Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия
[2] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: m.morozova@narfu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важным вопросом в технологии приготовления бетонной смеси является поиск путей эффективного использования свойств заполнителей (наполнителей) в твердеющих поликомпонентных системах. Самой распространенной вяжущей композицией является смесь вяжущей системы с измельченным кварцсодержащим полиминеральным песком. Известно, что микрокремнезем относится к активным минеральным добавкам (наполнителям), свойства которых принято характеризовать по количеству поглощенных из насыщенного известкового раствора ионов Ca^{2+}. Сейчас известны прямые аналитические методы определения пуццолановой активности, которые отслеживают изменение содержания $Ca(OH)_2$ во времени в ходе протекания пуццолановой реакции, и косвенные, которые направлены на определение физико-механических характеристик, отражающих способность исследуемого материала связывать свободный оксид кальция в устойчивые гидратные соединения. Ранее была подтверждена применимость потенциометрического метода анализа с использованием ион-селективного электрода с pCa-функцией для оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов. Следует отметить, что этот метод, функционально связанный с концентрацией определяемого компонента в испытуемом растворе, являются весьма эффективным с точки зрения экспрессности и трудоемкости. Поэтому целью исследований является апробация метода для микрокремнеземных систем, полученных способом механического помола полиминеральных песков различных месторождений. Для выполнения экспериментов были использованы пески месторождений Архангельской области. В качестве эталонного объекта для установления характера изменения функциональной взаимосвязи измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ был выбран кварцевый песок (КП). **Методы и материалы.** Полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» относится к аллювиально-морским современным четвертичным отложениям (am IV). Песок месторождения «Холмогорское» – это кварцево-полевошпатовый песок, который относится к аллювиальным современным четвертичным отложениям (a IV). Минералогический состав полиминеральных песков определен полуколичественным методом с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1. Тонкодисперсные порошки песков получали методом сухого механического помола на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100. Удельную поверхность порошков определяли методом газопроницаемости Козени-Кармана на установке ПСХ-10а. Для проведения потенциометрического анализа была собрана установка, представляющая собой электродную пару из измерительного электрода с pCa-функцией и электрода сравнения, подключенных к иономеру Эксперт-001-3.0.1 и погруженных в стеклянный стаканчик вместимостью 100 мл. Перемешивание реакционной системы осуществлялось с помощью магнитной мешалки. Калибровку электрода проводили по стандартным растворам хлорида кальция с разной концентрацией. Для определения сорбционной способности кремнеземсодержащего сырья предварительно готовили раствор извести и суспензию из проб тонкодисперсных порошков песков. В полученную суспензию последовательно добавляли известковый раствор и проводили измерение ЭДС (потенциал) системы при постоянном перемешивании. Далее рассчитывали концентрацию ионов кальция $C_ф$ по предварительно установленной калибровочной зависимости. Для определения активности строили зависимость между значениями задаваемой концентрации ионов кальция в растворе извести при добавлении ее определенного объема в суспензию исследуемых песков и значениями концентрации, полученными потенциометрическими измерениями. **Результаты и обсуждение.** Полученные тонкодисперсные порошки кварцсодержащих полиминеральных песков имели следующие значения удельной поверхности: кварцевый песок – 1020±31 м^2/кг, Краснофлотский Запад» – 465±14 и «Холмогорское» – 450±14 м^2/кг. Приведенные данные позволяют проводить сравнительный анализ экспериментальных потенциометрических измерений. Вместе с тем зависимость измеряемого потенциала от концентрации ионов кальция в растворе для суспензии кварцевого песка может быть использована в качестве некоторого эталона в связи с значительно более высокой удельной

© Фролова М.А., Лесовик В.С., Морозова М.В., Орехова Т.Н., 2025

поверхностью порошка, а следовательно, более ярко выраженной зависимостью $E = f(V_{доб})$. Полученная зависимость измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ в суспензию кварцевого песка (в качестве эталонного образца) и дистиллированную воду (в качестве холостого опыта) показали, что характер изменения функциональной взаимосвязи анализируемых двух образцов (КП и H_2O) различен, что свидетельствует о достаточной чувствительности используемого ион-селективного электрода к уровню задаваемых концентраций извести в растворе. Вместе с тем, можно отметить, что добавление раствора извести в воду приводит к практически постоянному росту значений измеряемого потенциала, величина которого пропорциональна $-lgC_{Ca}$, при этом начальный потенциал электродной пары (до ввода раствора извести) соответствует значению фоновой концентрации ионов кальция в растворе. Изменение потенциала электродной пары в суспензии порошка кварцевого песка имеет характер, отличный от вышеотмеченного для воды. Данную функциональную зависимость можно разделить на три периода. Первый – индукционный период, когда электродный потенциал линейно возрастает с увеличением концентрации $Ca(OH)_2$ в растворе. Наличие второго периода функциональной зависимости, на котором наблюдается стабилизация значений потенциала при добавлении в реакционную систему гидроксида кальция, связан непосредственно с адсорбционным (пуццолановым) эффектом тонкодисперсного кварца. Третий заключительный период характеризуется ростом величины потенциала электродов за счет появления избытка ионов Ca^{2+} в растворе. Полученные данные показывают, что наибольшую пуццолановую и адсорбционною активность по отношению к ионам кальция проявляет порошок месторождения «Краснофлотский Запад». Такая зависимость имеет ярко выраженный трехстадийный характер, фиксируемый нами при проведении аналогичного эксперимента с порошком кварцевого песка. Учитывая, что высокодисперсные кварцсодержащие порошки проявляют свойства сорбентов, разница в зависимостях может указывать также на количественное отличие в активных центрах адсорбции у исследуемых порошков и, как следствие, на разницу в их степени заполнения. Данный факт является кинетическим фактором процесса твердофазного концентрирования определяемых катионов. Используя алгоритм расчета параметров активности порошков по данным потенциометрии, были определены емкость поглощения оксида кальция и коэффициент гидравлической активности. Полученные результаты показали, что сорбционная емкость по отношению к оксиду кальция у полученных порошков исследуемых месторождений песков практически одинакова, однако характер функциональной зависимости изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения различается. Данные факт может свидетельствовать о разном механизме сорбционных процессов. **Заключение.** Показано, что потенциометрический метод определения сорбционной емкости по отношению к оксиду кальция может быть использован в качестве экспресс-способа для порошков кварцсодержащих полиминеральных песков. Для корректного расчета определяемых параметров при полностью повторяющихся условиях опытов необходимо проведение эксперимента с суспензией кварцевого песка и эксперимента сравнения, в котором в качестве объекта измерений используется вода растворения. Функциональную зависимость изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения можно использовать для сравнительной оценки механизма сорбционных процессов для порошков различной вещественной природы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полиминеральный кварцевый песок, пуццолановая активность, оксид кальция, концентрация гидроксида кальция, сорбционная емкость

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Фролова М.А., Лесовик В.С., Морозова М.В., Орехова Т.Н. Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41. – EDN: WPDJVA.

Potentiometric method for determination of hydraulic activity of quartz-containing powders

Maria A. Frolova[1], Valery S. Lesovik[2], Marina V. Morozova[1]*, Tatyana N. Orekhova[2]

[1] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
[2] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

* Corresponding author: e-mail: m.morozova@narfu.ru

ABSTRACT

Introduction. An important aspect of concrete mixture preparation technology is the exploration of methods to effectively utilize the properties of aggregates (fillers) in hardening multi-component systems. The most common binder composition is a mixture of

a binder system with crushed quartz-containing polymineral sand. It is known that micro silica is classified as an active mineral additive (filler), the properties of which are characterized by the amount of Ca^{2+} ions absorbed from a saturated lime solution. Literature sources describe two types of analytical methods for determining pozzolanic activity. The first type that trace the change in the content of $Ca(OH)_2$ over time during the pozzolanic reaction. The second type that aim to determine the physical and mechanical characteristics of the material under study. These characteristics reflect its ability to bind free calcium oxide into stable hydrate compounds. Previously applicability of the potentiometric method of analysis using an ion-selective electrode with pCa-function was demonstrated for the assessment of pozzolanic activity of highly dispersed materials. It should be noted to note that this electrochemical method of analysis which is functionally related to the concentration of the determined component in the tested solution, is very efficient in terms of expressiveness and labour intensity. The objective of the research is to validate the method for micro silica systems obtained by mechanical grinding of raw materials of polymineral sands from different deposits. The experiments were conducted using sands from the Arkhangelsk region deposits. The quartz sand (QS) was chosen as a reference object to establish the nature of change in the functional relationship of the measured potential of the electrode system from the volume of added $Ca(OH)_2$ solution. **Methods and Materials.** The polymineral sand of the Krasnoflotsky-West deposit is categorised as alluvial-marine modern Quaternary sediments (am IV). The sand of the Kholmogorskoye deposit is quartz-feldspathic sand, which belongs to alluvial modern Quaternary sediments (a IV). The mineralogical composition of polymineral sands was determined by means of the semi-quantitative method, utilising the binocular microscope MBS-1. Fine sand powders were obtained by dry mechanical grinding in a Retsch PM100 planetary. The specific surface area of the obtained fine powders was measured by the Kozeny-Karman gas permeability method on a PSKh-10a apparatus. The potentiometric analysis was conducted using an apparatus comprising an electrode pair, consisting of a measuring electrode with pCa-function and a reference electrode connected to an Expert-001-3.0.1 ionometer. The reaction system was stirred using a magnetic stirrer. In order to ascertain the sorption capacity of silica-containing raw materials, a lime solution with a concentration and a suspension of fine sand powders were prepared in advance. Concurrently, the EMF (potential) of the system was measured, with constant stirring. The concentration of calcium ions, C_{act}, was then calculated based on the previously established calibration dependence, using the potential values (mV) obtained. In order to determine the activity of fine mineral powders of silica, the dependence between the values of the given concentration of calcium ions in lime solution when adding a certain volume of lime to the suspension of the studied sands and the concentration values obtained by potentiometric measurements was plotted. **Results and Discussion.** The obtained powders of quartz-containing polymineral sands, which had been finely dispersed, had the following specific surface values: quartz sand – 1020±31 m^2/kg, Krasnoflotsky West – 465±14 m^2/kg and Kholmogorskoye – 450±14 m^2/kg. The given data on the specific surface of powders of natural origin allow for a comparative analysis of experimental potentiometric measurements. Concurrently, the dependence of the measured potential on the concentration of calcium ions in the solution for quartz sand suspension can be utilised as a reference, given the significantly high specific surface of the powder, thereby resulting in a more pronounced dependence $E = f(V_{add})$. Relationship obtained the dependence of the measured potential of the electrode system on the volume of added $Ca(OH)_2$ solution in a suspension of quartz sand (as a reference sample) and distilled water (as an idle experiment) shows that the nature of the change in the functional relationship of the analysed two samples (QS and H_2O) is different. Concurrently, it can be observed that the incorporation of a lime solution into water (in accordance with the anticipated outcome) results in a nearly constant augmentation in the measured potential values, the magnitude of which is proportional to $-lgC_{Ca}$. Change of potential of electrode pair in suspension of quartz sand powder has character different from that mentioned above for water. This functional dependency can be divided into three periods. The initial period is characterised by an induction phase, during which the electrode potential displays a linear increase in accordance with the rising concentration of $Ca(OH)_2$ within the solution. The presence of a second period of functional dependence, where stabilisation of potential values is observed when calcium hydroxide is added to the reaction system, is directly related to the adsorption (pozzolanic) effect of finely dispersed quartz. The third and final period is characterised by the growth of the electrode potential value due to the appearance of excess Ca^{2+} ions in the solution. The data presented demonstrate that the powder from the Krasnoflotsky-West deposit exhibits the highest pozzolanic and adsorption activity in relation to calcium ions. The dependence has a pronounced three-stage character, as determined by us through conducting a similar experiment with quartz sand powder. Given that quartz-containing powders with high dispersion exhibit sorbent properties discrepancy in the dependencies may signify a quantitative variation in the active adsorption centres of the studied powders, consequently resulting in a disparity in their degree of filling. This fact is a kinetic factor in the process of solid-phase concentration of the determined cations. The results obtained demonstrated that the sorption capacity of calcium oxide in the powders of the studied sand deposits was practically equivalent. However, the character of the functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value was different. This observation suggests the potential for distinct mechanisms underlying the sorption processes. **Conclusion.** The paper demonstrates that the potentiometric method of determining the sorption capacity of calcium oxide can be used as an express method for powders of quartz-containing polymineral sands. It is demonstrated that to accurately calculate the specified parameters under experimental conditions that ensure full reproducibility, it is essential to conduct an experiment using a suspension of quartz sand (as a reference sample) alongside a comparative experiment in which the dissolution water serves as the measurement object. The functional dependence of the change in the determined concentration of calcium hydroxide in the solution relative to its added value can be used for comparative evaluation of the mechanism of sorption processes for powders of different material nature.

KEYWORDS: polymineral quartz sand, pozzolanic activity, calcium oxide, calcium hydroxide concentration, sorption capacity

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

FOR CITATION:
Frolova M.A., Lesovik V.S., Morozova M.V., Orekhova T.N. Potentiometric method for determination of hydraulic activity of quartz-containing powders. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-32-41. – EDN: WPDJVA.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных вопросов в технологии приготовления бетонной смеси является поиск путей эффективного использования свойств заполнителей (наполнителей) в твердеющих поликомпонентных системах [1]. Известно, что самой распространенной вяжущей композицией является смесь вяжущей системы с мелкими (наполнитель) фракциями природных и (или) техногенных материалов. Из природных материалов для бетонных смесей в качестве наполнителей традиционно используют измельченные кварцсодержащие полиминеральные пески. В этом случае степень измельчения кремнезема должна быть не ниже (или соизмерима) с размерами частиц вяжущего вещества. При этих условиях зерна наполнителя будут окружены продуктами гидратации цемента, поэтому введение наполнителя ускоряет процесс гидратации цементных зерен. Таким образом, на поверхности зерен наполнителя гелеобразная фаза уплотняется и кристаллизуется более интенсивно. Кроме того, в ряде случаев наполнитель оказывает модифицирующее влияние на продукты гидратации цементных зерен, способствуя развитию кристаллических новообразований.

Согласно [2], микрокремнезем (тонкоизмельченный кварцсодержащий песок) относится к активным минеральным добавкам (наполнителям), свойства которых принято характеризовать по количеству поглощенных из насыщенного известкового раствора ионов Ca^{2+}.

В литературных источниках описываются прямые аналитические методы определения пуццолановой активности, которые отслеживают изменение содержания $Ca(OH)_2$ во времени в ходе протекания пуццолановой реакции, и косвенные, которые направлены на определение физико-механических характеристик, отражающих способность исследуемого материала связывать свободный оксид кальция в устойчивые гидратные соединения [3–7]. В работе [8] нами показана применимость потенциометрического метода анализа с использованием ион-селективного электрода с pCa-функцией для оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов на примере моделей глинистых грунтов с разным числом пластичности. Следует отметить, что этот электрохимический метод анализа, основанный на измерении электродного потенциала, функционально связанного с концентрацией определяемого компонента в испытуемом растворе, являются весьма эффективным с точки зрения экспрессности и трудоемкости. Целью исследований, представленных в данной работе, является апробация метода для микрокремнеземных систем, полученных способом механического помола сырьевых материалов полиминеральных песков различных месторождений. Для выполнения экспериментов были использованы пески месторождений Архангельской области (рис. 1):

Рис. 1. Месторождения полиминеральных песков Архангельской области:
1 – месторождение «Краснофлотский-Запад»; 2 – месторождение «Холмогорское»

«Краснофлотский-Запад» (КЗ) и «Холмогорское» (Х) [9, 10]. В качестве эталонного объекта для установления характера изменения функциональной взаимосвязи измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ был выбран кварцевый песок (КП) (Вольский монофракционный песок по ГОСТ 6139-2003), фракция 0,1–0,2 мм, содержащий не менее 98% SiO_2 и плотностью 2610 кг/м^3.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» относится к аллювиально-морским современным четвертичным отложениям (am IV). Название месторождения обусловлено его территориальной принадлежностью, а именно берегом острова Краснофлотский. Модуль крупности $M_к$ = 1,7, что соответствует по классификации мелкому песку. Истинная плотность 2710 кг/м^3.

Песок месторождения «Холмогорское» — это кварцево-полевошпатовый песок, который относится к аллювиальным современным четвертичным отложениям (a IV). Песок находится в пределах 2 км от с. Холмогоры. Модуль крупности $M_к$ = 1,5, что соответствует по классификации мелкому песку. Истинная плотность 2230 кг/м^3.

Элементный состав опытных образцов в пересчете на оксиды представлен в табл. 1.

Минералогический состав полиминеральных песков определен полуколичественным методом с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1. Результаты минералогического анализа представлены в табл. 2.

Тонкодисперсные порошки песков получали методом сухого механического помола на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 (скорость вращения ротора 420 об/мин) в продолжении 40 мин. Удельную поверхность полученных тонкодисперсных порошков измеряли методом газопроницаемости Козени-Кармана на установке ПСХ-10а.

Для проведения потенциометрического анализа была собрана установка, представляющая собой электродную пару из измерительного электрода с pCa-функцией и электрода сравнения, подключенных к иономеру Эксперт-001-3.0.1 и погруженных в стеклянный стаканчик вместимостью 100 мл. Перемешивание реакционной системы осуществлялось с помощью магнитной мешалки. Эксперименты проводились при температуре 20±2 °C. Перед началом проведения эксперимента кальций-селективный электрод ХС-Ca-001 выдерживался в течение 3 суток в 0,01 моль/л растворе хлорида кальция, после чего электрод тщательно отмывали дистиллированной водой до фиксации стабильного и минимального значения электрического сигнала (электродного потенциала). Затем проводили калибровку электрода по стандартным растворам хлорида кальция (приготовленным предварительно) с концентрациями (C_{Ca}) 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4} и 10^{-5} моль/л. Известно, что ЭДС смонтированной электродной пары подчиняется классическому уравнению (допуская, что коэффициент активности ионов Ca^{+2} для областей рабочих концентраций

Таблица 1. Элементный состав (в %) полиминеральных песков [11]

Образец	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	п.п.п.
КЗ	91,35	5,06	0,74	0,65	0,26	0,36	1,37	0,21
Х	77,48	12,13	1,80	1,61	1,45	2,09	2,76	0,68

Таблица 2. Результаты минералогического анализа шлихов (песков)

Образец	Описание
КЗ	Песок мелкозернистый светло-серый с коричневым оттенком, состоящий из окатанных и угловатых зерен (песчинок) различных минералов и горных пород. По минеральному составу преобладает кварц (около 90 %), в подчиненном количестве содержатся полевые шпаты серого и розового цвета (5-7%), рудные непрозрачные минералы черного и темно-коричневого цвета, гранаты, обломки горных пород (гранито-гнейсов, кварцитов).
Х	Песок мелкозернистый светло-серый с коричневым оттенком, состоящий из окатанных и угловатых зерен (песчинок) различных минералов и горных пород. По минеральному составу преобладает кварц (около 80%), в подчиненном количестве содержатся полевые шпаты серого и розового цвета (5-8%), рудные непрозрачные минералы черного и темно-коричневого цвета, гранаты, магнетит, слюда, обломки горных пород (гранито-гнейсов, кварцитов).

ионов кальция $10^{-2} \div 10^{-4}$ моль/л по значению близок к единице) [12]:

$$E = E_0 + \frac{2{,}303RT}{nF} lgC_{Ca} = E_0 - a \cdot pCa, \quad (1)$$

где E и E_0 – измеряемая величина ЭДС и стандартная, постоянная величина (зависит от температуры раствора), *мВ*, соответственно;

R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/К;

F – постоянная Фарадея, 96500 Кл/моль;

$n = 2$ – число электронов, участвующих в электродной реакции, обычно численно равно заряду иона;

$a = 0{,}029$ – постоянная для $T = 293$ К;

$pCa = -lgC_{Ca}$.

Для определения сорбционной способности кремнеземсодержащего сырья предварительно готовили раствор извести с концентрацией 0,015 моль/л (насыщенный раствор при 20 °С) и суспензию из проб тонкодисперсных порошков песков (навеска 0,5 г в 80 мл дистиллированной воды). В полученную суспензию с помощью лабораторного дозатора последовательно добавляли известковый раствор объемом 0,2–0,8 мл и проводили измерение ЭДС (потенциал) системы при постоянном перемешивании. Исходя из полученных значений потенциалов (мВ), рассчитывали концентрацию ионов кальция $C_ф$ по предварительно установленной калибровочной зависимости.

Для определения активности тонкодисперсных минеральных порошков кремнезема строили зависимость между значениями задаваемой концентрации ионов кальция в растворе извести $C_{теор}$ при добавлении ее определенного объема в суспензию исследуемых песков и значениями концентрации, полученными потенциометрическими измерениями $C_{факт}$. Концентрацию ионов кальция в растворе извести с учетом разбавления раствора ($C_{теор}$) определяли по формуле:

$$C_{теор} = C_0 \frac{V_{доб}}{V_{общ}}, \quad (3)$$

где C_0 – исходная концентрация насыщенного раствора извести, 0,015 моль/л,

$V_{доб}$ – суммарный объем добавляемого раствора извести, мл,

$V_{общ}$ – общий объем системы, $(80+V_{доб})$ мл.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные тонкодисперсные порошки кварцсодержащих полиминеральных песков имели следующие значения удельной поверхности ($S_{уд}$, м²/кг): кварцевый песок – 1020±31, Краснофлотский Запад» – 465±14 и «Холмогорское» – 450±14. Приведенные данные по удельной поверхности порошков природного происхождения, по нашему мнению, позволяют проводить сравнительный анализ экспериментальных потенциометрических измерений. Вместе с тем зависимость измеряемого потенциала от концентрации ионов кальция в растворе для суспензии кварцевого песка может быть использована в качестве некоторого эталона в связи со значительно более высокой Sуд порошка, а следовательно, более ярко выраженной зависимостью $E = f(V_{доб})$.

На рис. 2 представлена полученная калибровочная зависимость $E = f(pCa)$, которая характеризуется прямой линией с математическим уравнением: $E = -28{,}2pCa + 309$ (коэффициент достоверности

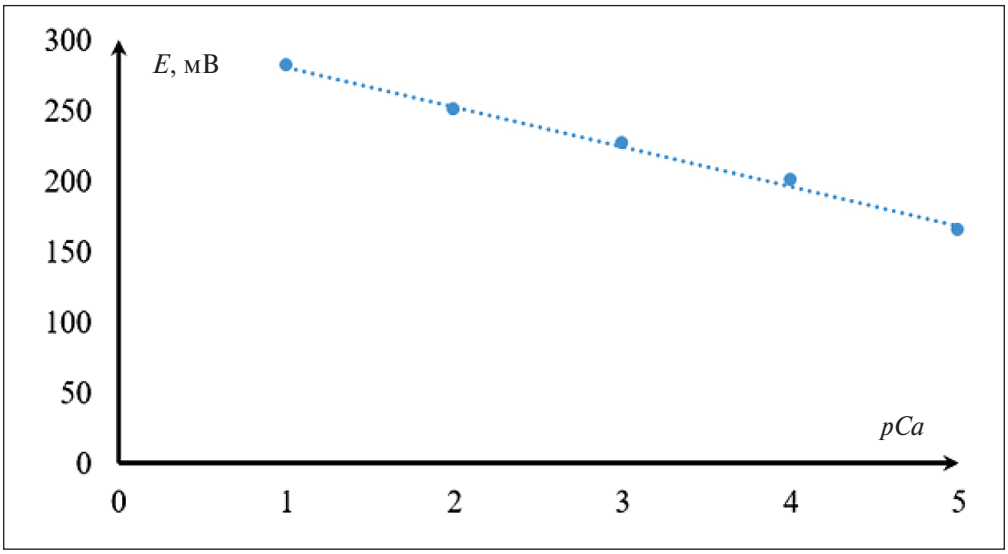


Рис. 2. Калибровочная зависимость $E = f(pCa)$

аппроксимации, $R^2 = 0,99$). Угловой коэффициент 2,303RT/nF экспериментально полученной зависимости близок к теоретическому, расхождение между этими значениями составило 2,8%. Данный факт, по нашему мнению, может свидетельствовать о корректности используемой лабораторной установки для измерения электродного потенциала в водных известь содержащих растворах в выбранном диапазоне концентраций $Ca(OH)_2$.

На рис. 3 приведена зависимость измеряемого потенциала электродной системы от объема добавляемого раствора $Ca(OH)_2$ в суспензию кварцевого песка (в качестве эталонного образца) и дистиллированную воду (в качестве холостого опыта), которые показывают, что характер изменения функциональной взаимосвязи анализируемых двух образцов (КП и H_2O) различен, что свидетельствует о достаточной чувствительности используемого ион-селективного электрода к уровню задаваемых концентраций извести в растворе.

Вместе с тем, можно отметить, что добавление раствора извести в воду (как и ожидалось) приводит к практически постоянному росту значений измеряемого потенциала, величина которого пропорциональна $-lgC_{Ca}$, при этом начальный потенциал электродной пары (до ввода раствора извести) соответствует значению фоновой концентрации ионов кальция в растворе. Так, зависимость $E = f(V)$ для холостого опыта (рис. 3) описывается уравнением полинома второй степени:

$$E = -0,030V^2 + 1,664V + 165. \quad (3)$$

Тогда фоновая концентрация ионов кальция в растворе составит 10^{-5} моль/л. Данное значение учтено нами при расчетах текущей концентрации ионов кальция в реакционной среде при анализе экспериментальных результатов, полученных для исследуемых образцов минеральных песков.

Изменение потенциала электродной пары в суспензии порошка кварцевого песка имеет характер, отличный от вышеотмеченного для воды. Так, данную функциональную зависимость можно разделить на три периода. Первый – индукционный период, когда электродный потенциал линейно возрастает с увеличением концентрации $Ca(OH)_2$ в растворе. Данный эффект, на наш взгляд, связан с перестройкой двойного электрического слоя частиц, в результате которого происходит компенсация отрицательного по знаку заряда поверхности кварца положительно заряженными ионами Ca^{2+}. Наличие второго периода функциональной зависимости, на котором наблюдается стабилизация значений потенциала при добавлении в реакционную систему гидроксида кальция, связан непосредственно с адсорбционным (пуццолановым) эффектом тонкодисперсного кварца. Третий заключительный период характеризуется ростом величины потенциала электродов за счет появления избытка ионов Ca^{2+} в растворе.

На рис. 4 представлены функциональные зависимости $C_{факт} = f(C_{теор})$ для исследуемых порошков природных песков, рассчитанные по данным потенциометрических измерений.

Представленные данные показывают, что наибольшую пуццолановую и адсорбционною актив-

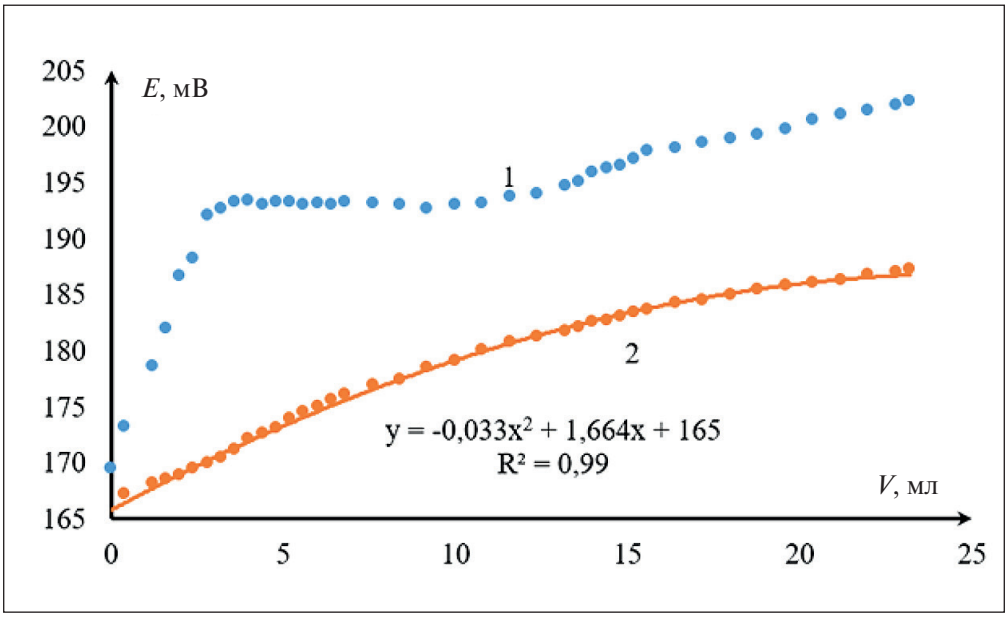


Рис. 3. Потенциал электродной пары при добавлении раствора $Ca(OH)_2$: 1 – в суспензию порошка кварцевого песка; 2 – в дистиллированную воду

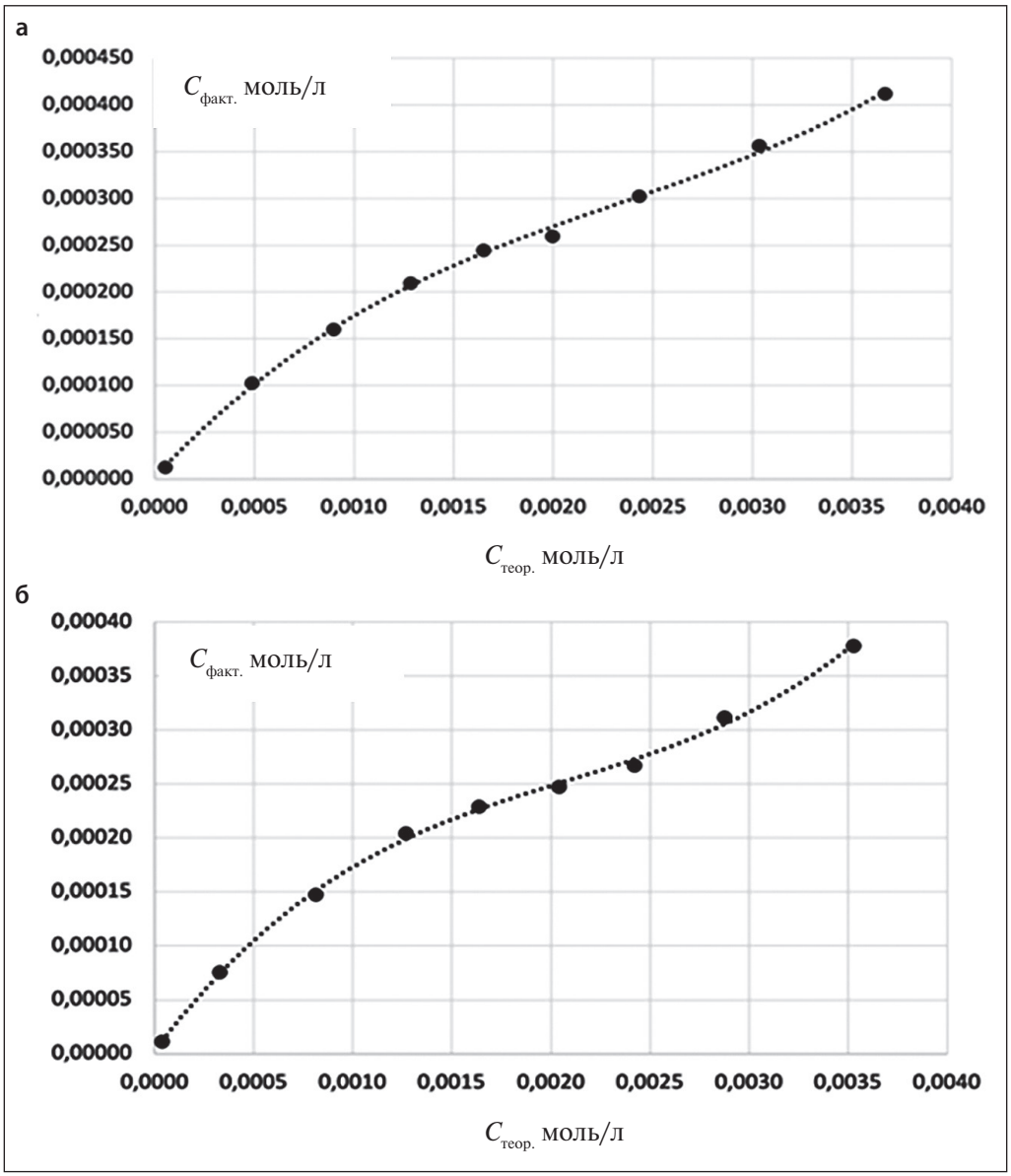


Рис. 4. Концентрационные зависимости $C_{факт} = f(C_{теор})$ для порошков: а – «Холмогорское»; б – «Краснофлотский Запад»

ность по отношению к ионам кальция проявляет порошок месторождения «Краснофлотский Запад» (рис. 4б). Зависимость (рис. 4б) имеет ярко выраженный трехстадийный характер, фиксируемый нами при проведении аналогичного эксперимента с порошком кварцевого песка.

Учитывая, что высокодисперсные кварцсодержащие порошки проявляют свойства сорбентов [13], отличие в приведенных на рис. 4 (а и б) зависимостях (несмотря на практически одинаковые значения удельной поверхности порошков), может указывать также на количественное отличие в активных центрах адсорбции у исследуемых порошков и, как следствие, на разницу в их степени заполнения. Данный факт, по мнению авторов [13], является кинетическим фактором процесса твердофазного концентрирования определяемых катионов.

Используя алгоритм расчета параметров активности порошков по данным потенциометрии, представленный нами в [8], определили в качестве характеристики поглощения исследуемыми кварцсодержащими дисперсными системами емкость поглощения оксида кальция ($\alpha_{CaO} = \Delta C_{CaO} = (\Delta C_{Ca(OH)_2} / M_{Ca(OH)_2}) \cdot M_{CaO}$) и коэффициент гидравлической активности ($H = ln\sqrt[3]{\alpha_{CaO}}$). Полученные результаты приведены в табл. 3.

Полученные результаты (табл. 3) показали, что сорбционная емкость по отношению к оксиду каль-

Таблица 3. Характеристика активности порошков

Порошок	$C_{теор}$, моль/л	$C_{факт}$, моль/л	$\Delta C_{Ca(OH)_2}$, моль/л	$\Delta C_{Ca(OH)_2}$, мг/г	α_{CaO}, мг/г	$Г_{\alpha}$
X	$2{,}50 \cdot 10^{-3}$	$0{,}29 \cdot 10^{-3}$	$2{,}21 \cdot 10^{-3}$	26,2	19,83	0,99
КЗ		$0{,}19 \cdot 10^{-3}$	$2{,}31 \cdot 10^{-3}$	26,6	20,13	1,00

ция у полученных порошков исследуемых месторождений песков практически одинакова, однако характер функциональной зависимости изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения различается. Данный факт может свидетельствовать о разном механизме сорбционных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения можно отметить следующие положения:

1. Показано, что потенциометрический метод определения сорбционной емкости по отношению к оксиду кальция может быть использован в качестве экспресс-способа для порошков кварцсодержащих полиминеральных песков.

2. Показано, что для корректного расчета определяемых параметров при полностью повторяющихся условиях опытов необходимо проведение эксперимента с суспензией кварцевого песка (в качестве эталонного образца) и эксперимента сравнения, в котором в качестве объекта измерений используется вода растворения.

3. Функциональную зависимость изменения определяемой концентрации гидроксида кальция в растворе относительно добавляемого ее значения можно использовать для сравнительной оценки механизма сорбционных процессов для порошков различной вещественной природы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее. *Вестник МГСУ*. 2017;12(1):9–16.

2. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Э. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012;(3):10-15.

3. Cepurītis R., Wigum B.J., Garboczi E.J., Mørtsell E., Jacobsen S. Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution. *Cement & Concrete Composites*. 2014;54: 2-16. 2. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.010

4. Donatello M., Tyrer C.R., Cheeseman. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(2):121-127.

5. Pontes J., Santos Silva A., Faria P. Evaluation of Pozzolanic Reactivity of Artificial Pozzolans. *Tech Publications, Switzerland, Materials Science Forum*. 2013;433-438.

6. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения пуццолановой активности минеральных добавок. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2017;7-8:29–33.

7. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Хмара Н.О., Буковцова А.И., Денисова Ю.В. Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему. *Строительные материалы*. 2022;6:61-66.

8. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Шинкарук А.А., Махова Т.А. Потенциометрический метод оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(4):349–358.

9. *Природные сырьевые материалы строительного назначения в Северо-Арктическом регионе. Минерально-сырьевая база Архангельской области*. под ред. А.М. Айзенштадта, А.Л. Невзорова, В.С. Лесовика. Архангельск. С(А)ФУ.2011;148.

10. *Атлас Архангельской области*. Научно-редакционная картосоставительная часть ГУГК. Москва. 1976; 72.

11. Шаманина А.В., Кононова В.М., Данилов В.Е., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Аспекты определения активности поверхности дисперсных систем на основе минеральных порошков. *Материаловедение*. 2021;7:30-36.

12. *Краткий справочник физико-химических величин*. Издание десятое, испр. и дополн. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. СПб.: «Иван Федоров». 2003; 240.

13. Сютова Е.А., Джигола Л.А. Исследование кинетических закономерностей твердофазного концентрирования ионов кальция природными сорбентами. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2020;20(1):64–78.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фролова Мария Аркадьевна – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения, реставрации и экологии в строительстве, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, m.aizenstadt@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4079-5066

Лесовик Валерий Станиславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, naukavs@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2378-3947

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

Орехова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, ptdm-bgtu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1849-5681

ВКЛАД АВТОРОВ

Фролова М.А. – проведение исследований, сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

Лесовик В.С. – написание статьи, научное редактирование текста.

Морозова М.В. – проведение исследований, сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

Орехова Т.Н. – проведение исследований, сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 06.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Wuhan University of Technology (WUT), is a state key university directly affiliated to the Ministry of Education of the People's Republic of China. WUT is among the first batch of universities which have entered the national "211 Project" and China's "Double-First Class" Initiative. WUT is jointly developed by the Ministry of Education and the Ministry of Transport. As the university directly affiliated to the Ministry of Education which cultivates the largest number of talents in three major industrial sectors, namely, building and construction materials, transportation, and automobile industries, WUT becomes an important base for the cultivation of high-level scientific talents and technological innovation for the three industrial sectors.

WUT has three campuses, including Mafangshan campus, Yujiatou campus and the South Lake campus, with a total land area of 2.67 million square meters and a total gross floor area of 1.95 million square meters. Currently, WUT has over 50,000 faculty and students, 24 academic schools, 4 National Technology Innovation Bases and 4 modern libraries with a collection of 3.61 million books. Since 2000, WUT has been awarded over 20 national science and technology prizes, ranking in the forefront of all Chinese colleges and universities. In 2019, WUT was listed in Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

Since the founding of New China, WUT has cultivated more than 600,000 senior professionals. In the past decade, the first-time employment rate of graduates has

remained above 95%, and about 55% of total employment join world's top 500 enterprises and fields of strategic emerging industries.

Over the years, WUT has formed educational ideology system with distinctive characteristics, with the lofty ideal of "Building an excellent university to win worldwide recognition and admiration", the spirit of "Sound in morality, broad in learning and pursuing excellence", the principle of "Taking students' cultivation as our essence, and taking academic development as our priority", and the educational concept of "Implementing excellent education, nurturing excellent talents and creating an excellent life". Guided by the WUT Charter approved by the Ministry of Education, WUT is committed to the modernization of the governance system and capability, aiming to rank among the world-class universities with distinctive features.

MSE Discipline of Wuhan University of Technology

Founded in 1958, the Materials Science & Engineering (MSE) discipline of Wuhan University of Technology (WUT) was supported in priority through the "State 211 Project for Higher Education Universities" from 1995 to 2015, and has been supported via the "World-Class University & World-Class Discipline" development plan of China since 2016. WUT's MSE ranks A+ among 172 leading universities in China (No.1 alongside MSEs of Tsinghua University and Beihang University) in the 4th round national discipline evaluation organized by the Ministry of Education in 2017, and is world top 1‰ in Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

WUT's MSE owns 1 member of Chinese Academy of Sciences, 3 members of Chinese Academy of Engineering, 3 members of Academia Europaea, 1 member of the Royal Academy of Belgium, 1 member of the World Academy of Ceramics, 1 fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering, 10 fellows of the Royal Society of Chemistry, American Physics Society and American Ceramic Society. It also owns 23 national high-level talents including recipients of the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (equal of NSF Career Awards), and 22 national high-level young talents.

WUT's MSE has established 2 state key laboratories, the State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing and the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures. The State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing was evaluated "Excellence" among 21 state key laboratories in MSE in 2018. It also has built 2 state international joint-research laboratories, and 4 bases of foreign outstanding expertise-introduction for discipline innovation (also known as "111 Project").

International School of Materials Science and Engineering

The International School of Materials Science and Engineering (ISMSE) was selected into the list of "Network of International Centers for Education" supported by the State Administration of Foreign Experts

Affairs and Ministry of Education of P. R. C. in June 2015 as one of the 16 international schools all over the country.

Driven by the "National innovation driven development strategy" and the great demand for national higher education reformation, ISMSE is devoted to building a world-leading MSE discipline through optimizing a high-level research and teaching team, constructing an innovative training pilot zone and establishing an innovative talents training system. Guided by the idea of "enterprise cooperation, international cooperation and research cooperation", ISMSE organized 21 mentor teams lead by academicians or distinguished professors and 4 interdisciplinary innovation and entrepreneurship training teams.

Aiming at leading the world's building materials and new materials in the 21st century, ISMSE values the innovative ability as one of the core capabilities and reform the innovative talent training system of the bachelor program, master and PhD program and international program. ISMSE provides students with a comprehensive curriculum, which covers materials science, life science, energy science, environmental science, information science and advanced manufacturing science. To expose all students to international experiences, joint training programs were created in cooperation with world-leading universities. Furthermore, ISMSE built a variety of platforms for students' all-round development, such as Distinguished Scholars Forum, International Vision Forum, Quality Education Seminar and Material Advantage WUT Chapter. The Material Advantage WUT Chapter was awarded Chapter of Excellence Award in the past 5 years from 2018 to 2022.

State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing (Wuhan University of Technology)

The State Key Laboratory of Advanced Technology for Material Synthesis and Processing was approved by the State Development Planning Commission in 1987. After state inspection, it was opened for the public in March 1990. The laboratory is under the direct administration of the Ministry of Science and Technology. Currently, Professor Gu Binglin, an academician of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory's academic committee, and Professor Fu ZhengYi, an academician of the Chinese Academy of Engineering, is the Director of the laboratory. The laboratory is located in the Wuhan University of Technology, and it is a state key laboratory that specializes in the field of new materials. The Department of Materials Science and Engineering at the Wuhan University of Technology has been classified as a first-class State Key Discipline, included in the national "985" project of "Build a world-class discipline program," and is ranked as A+ in the fourth round of national discipline evaluation. Aiming at the global frontier research of materials science and addressing the primary national needs, this laboratory provides a world-class platform for materials compounding and preparation technology, for developing advanced composite materials for national major projects and pillar industries, and for providing support at the national strategic level. Original and systematic research results, with international impact in transformative technologies, frontier new materials, and interdisciplinary fields, have been reported in this

laboratory, and therefore, it leads the international development in several strategic frontier new materials. The laboratory fosters the development of global first-class research talent through advanced scientific research in the field of materials science and technology. In addition, the laboratory has created a culture of international collaborative innovation and has carried out "Win-Win" international cooperative research, thereby enhancing the international influence, attractiveness, and cohesion of the laboratory. The laboratory has achieved a historic breakthrough in the evaluation of the State Key laboratories in the field of materials science.

Centering on the overall vision and objectives, the laboratory focuses on the establishment and development of multi-component, multi-scale, and multi-level composite principles and material design theories that are built on core research platforms comprising material gradient composite technology, in-situ composite technology, nanocomposite technology, and their integrated innovations. Currently, research on five key materials, including advanced composite materials for national major projects and pillar industries, efficient energy conversion and storage materials for new energy technologies, nanocomposite biomaterials for life sciences, information functional materials for information technology, and frontier new materials for transformative technologies, is being carried out in this laboratory. Therefore, the laboratory has established the following five distinctive research directions: gradient composite technology and new materials, in-situ composite technology and new materials, nanocomposite technology and new materials, transformative technology and frontier new materials, and material composite principles and material design.

The laboratory has an active and innovative research team that mainly comprise young and middle-aged researchers. There are hundred permanent staff members, including one academician of the Chinese Academy of Sciences, two academicians of the Chinese Academy of Engineering, one academician of the Royal Academies for Science and the Arts of Belgium, two academicians of the European Academy of Sciences and Arts, one academician of the Australian Academy of Technology and Engineering, one academician of the World Academy of Ceramics, twelve national level researchers, one chief scientist of the National "973" program, five recipients of the national "Outstanding Youth Science Fund," and thirty recipients of the "national talent Support Plan". etc. This laboratory has been actively supporting outstanding scholars to visit and conduct collaborative research worldwide in world-class universities and research institutions. In recent years, the laboratory has sent several outstanding young scholars to world-class international universities for more than one year to conduct visits and collaborative research.

The laboratory emphasizes global academic exchange and collaboration. In the last five years, we have hired twenty-five international scholars as honorary and visiting professors in the main research areas, with an aim to create cordial working conditions for world-renowned scientists to conduct collaborative research in the laboratory.

The laboratory has carried out substantial "Win-Win" collaborations with the University of Michigan; Japan

Aerospace Exploration Agency (JAXA); the Institute for Materials Research, Tohoku University (Japan); the Materials Research Center, University of Oxford (UK); Composites Research Center, the University of California (US); and the National Institute of Fuel Cells (Canada), among other internationally renowned research institutions. The Ministry of Science and Technology has established the "International Joint Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing," which is one of the first thirty-three international joint laboratories in China. Additionally, the State Administration of Foreign Experts Affairs and the Ministry of Education have jointly formed three discipline bases supported by the Program of Innovation and Talent Introduction, namely "New Material Composite Technology and Advanced Functional Materials," "Advanced Preparation Technology and Application Engineering of New Functional Thin Film Materials," and "Innovation and Talent Introduction Base of Life Composites." Relying on these important international collaboration platforms, the laboratory has undertaken several state key projects with international collaborations and achieved fruitful results in international collaboration and exchanges.

Currently, the laboratory has a floor area of 25,350 square meters, with several advanced materials synthesis and processing instruments, as well as state-of-the-art instruments specializing in materials structure analysis, characterization, and performance testing. The total estimated value of the instrumentation asset is approximately 430 million RMB.

Introduction to the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture

The State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture was authorized by the Ministry of Science and Technology of China (MoST) in October 2011, and passed the expert acceptance of MoST in July 2013. The laboratory aims to solve the major fundamental theories and common key technology issues during the preparation and service process of silicate materials for architectures, develop low environmental load preparation methods and energy efficiency enhancement theories, research and develop high performance and multifunctional building materials to support major engineering construction and the development of green, energy-saving and intelligent building systems, and provide new theories, new methods and common key technologies for achieving long-term stability and recycling of building materials and structures.

The main research directions of the laboratory comprise the low environment load preparation, the functional design and regulation, the service behavior and life extension principles as well as the recycling design of silicate materials for architecture.

The Laboratory shares a construction area of 12 500 m² and lots of professional research equipment worth more than 100 million RMB, forming a research platform including eight professional secondary laboratories and one public experiment center. The research platform is able to support the research of the science and technology in the field of thermal equipment, cement and cementitious materials, concrete, glass, ceramics, film and coating, wall and road materials.

The Laboratory is open to both domestic and international applications, and values domestic and international academic exchanges and cooperation. Relying on the laboratory, the "International Science and Technology Cooperation Base for Environmental Friendly Building Materials" was established and was identified as a model of international science and technology cooperation base by MoST in 2013.

The innovation achievements of scientific research of the laboratory contribute a lot to the national economy and social development, including providing key technical support for the construction of national major infrastructures, boosting the structural transformation and technological upgrading of traditional building materials industry, and promoting the implementation of energy saving and emission reduction strategies.

Introduction to Interdisciplinary Materials

The scientific journal Interdisciplinary Materials (ISSN: 2767-441X) was launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021.

Interdisciplinary Materials is an open-access, peer-reviewed, and rapid-publication journal focusing on the interdisciplinary researches between materials science and other disciplines, such as physics, chemistry, mathematics, mechanics, biology, energy, environment, information, engineering, etc. The journal aims at reporting cutting-edge developments across science and technology around the world.

Interdisciplinary Materials is expected to take an interdisciplinary, frontier, and integrated approach to all areas of materials research while cultivating the exchange of ideas between scientists involved in the different disciplines. Readership includes physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

The first issue was published in Jan, 2022. It has been included in the Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex and Directory of Open Access Journals (DOAJ) databases.

Contact information

Address: 122 Luoshi Road, Hongshan District, Wuhan, Hubei, P. R. China
Postal Code: 430070
Supporting Institution: Wuhan University of Technology
Tel: 86-27-87884448; Fax: 86-27-87879466
E-mail: sklwut@whut.edu.cn
Contacts: Zhao Xiang, Zhou Lihua

R

УХАНЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Уханьский технологический университет (УТУ) – национальный стратегический университет под прямым управлением Министерства образования. Является одним из первых университетов, вошедших в государственные программы «211 Project» и «Double-First Class» для содействия развитию университетов и научных направлений мирового уровня. УТУ был образован Министерством образования совместно с Министерством транспорта. Так как университет подчиняется напрямую Министерству образования, которое растит и развивает талантливые кадры в области строительства и строительных материалов, транспорта и автомобилестроения, УТУ стал важным центром по подготовке научных кадров и технологических инновационных разработок для этих трех крупнейших промышленных секторов.

Университет включает 3 кампуса: Мафангшан, Юдзитау и СауфЛейк, в общей сложности занимающих площадь 267 гектаров общей площадью зданий 1,95 млн м^2. В настоящее время в УТУ работают более 50 тыс. человек персонала и студентов, 24 академические школы, 4 Национальных технологических инновационных центра и 4 современные библиотеки с фондом в 3,61 млн изданий. С 2000 года УТУ удостоился 20 государственных национальных научных и технических премий, занимая первые позиции в рейтинге всех китайских университетов и колледжей. В 2019 году УТУ был включен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 тыс. высокопрофессиональных специалистов. В течение последних десяти лет процент впервые трудоустроенных выпускников остается свыше 95% и составляет около 55% от всех трудоустроенных выпускников в международном рейтинге «Top 500 компаний и новых отраслей».

На протяжении многих лет УТУ сформировал отличительную идеологию системы образования с высокими идеалами «Построения отличного университета для завоевания всемирного признания и восхищения», следуя девизу «Быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «Сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие – приоритетом». Университет воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию системы государственного регулирования с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

Здание корпуса научного направления «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) Уханьского технологического университета

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной программой «211 проектов для университетов» («State 211 Project for Higher Education Universities») в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты мирового уровня и научные направления мирового уровня» («World-Class University & World-Class Discipline»). Рейтинг этого направления составляет A+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№ 1 наравне с этим направлением в университетах Тцинхуа и Бейхан) в 4-ом раунде оценки, организованном Министерством образования в 2017 году, а также входит в топ 1% в международный системе Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

В развитие МИД вовлечены: 1 член Китайской академии наук, 3 члена Китайской инженерной академии, 3 члена Европейской академии, 1 член Бельгийской королевской академии, 1 член Международной академии керамики, 1 стипендиат Австралийской академии технологий и инженерии, 10 стипендиатов Королевского химического общества, Американского общества физики и Американского общества керамики. Также в МИД работают 23 китайских высокопрофессиональных сотрудника, некоторые из которых являются стипендиатами Национального фонда National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (аналогичен премии NSF Career Awards), и 22 китайских молодых специалиста.

Для содействия развитию научного направления МИД были основаны 2 государственных ключевых лаборатории: Государственная ключевая лаборатория передовых технологий синтеза и обработки

материалов и Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры. Первая лаборатория получила оценку «превосходно» среди 21 государственной ключевой лаборатории по МИД в 2018 году. Помимо этого, были построены 2 государственных международных лаборатории для совместных исследований и 4 базы внедрения зарубежных компетенций как инновационного составляющего научной области (известный как «111 Project»).

Международная школа материаловедения и инженерии

Международная школа материаловедения и инженерного дела (МШМИД) была включена в список «Сети международных образовательных центров» при поддержке Государственной администрации КНР по делам иностранных экспертов и Министерства образования КНР в июне 2015 года как одна из 16 международных школ по всей стране.

Руководствуясь «Национальной стратегией развития, ориентированной на инновации» и большую потребность в реформировании национальной системы высшего образования, МШМИД стремится создать ведущее в мире направление МИД путем привлечения исследовательского и преподавательского состава высокого уровня, создания инновационной пилотной зоны обучения и формирования инновационной системы подготовки талантов. Руководствуясь идеями «сотрудничества предприятий, международной кооперации и сотрудничества в области исследований», МШМИД организовала 21 группу наставников под руководством ученых или видных профессоров, а также 4 междисциплинарные группы по обучению инновациям и предпринимательству.

Стремясь стать ведущим мировым разработчиком строительных материалов и новых материалов в 21 веке, МШМИД оценивает инновационные способности как одну из ключевых возможностей и проводит реформирование инновационной системы подготовки кадров в рамках программы бакалавриата, магистратуры и докторантуры, а также международной программы обучения. МШМИД предлагает студентам всеобъемлющую учебную программу, которая охватывает материаловедение, естественные науки, отраслевые энергетические науки, науки об окружающей среде, информатику и изучение передовых производственных технологий. Чтобы познакомить всех студентов с международным опытом, реализуются совместные программы обучения в сотрудничестве с ведущими мировыми университетами. Кроме того, при МШМИД создано несколько платформ для всестороннего развития студентов, таких как Форум выдающихся исследователей, Международный форум по видению будущего развития, Семинар оценки качества образования, Студенческое научное общество (СНО) материаловедения Уханьского технологического университета. СНО материаловедения пять лет подряд с 2018 по 2022 год удостаивается награды Chapter of Excellence Award.

Государственная стратегическая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов (Уханьский технологический университет)

Государственная ключевая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов была утверждена Государственной комиссией планирования развития в 1987 году. После государственной инспекции она была открыта для общественности в марте 1990 года. Лаборатория находится в непосредственном ведении Министерства науки и технологии. В настоящее время профессор Гу Бинлинь, академик Китайской академии наук, является председателем академического Комитета лаборатории, а профессор Фу Чжэн И, академик Китайской инженерной академии, является директором лаборатории. Лаборатория расположена в Уханьском технологическом университете и является ключевой государственной лабораторией, специализирующейся в области новых материалов. Факультет материаловедения и инженерного дела Уханьского технологического университета был классифицирован как первоклассное государственное ключевое научное направление, включенное в национальный проект «985», «Создание учебной программы мирового уровня» и получил оценку A+ в четвертом раунде национальной оценки научных направлений. Стремясь к глобальным передовым исследованиям в области материаловедения и удовлетворяя основные национальные потребности, эта лаборатория представляет собой платформу мирового класса для технологии компаундирования и подготовки материалов, для разработки передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и отраслей промышленности, а также для оказания поддержки на национальном стратегическом уровне. Лаборатория сообщила об оригинальных и систематических результатах исследований с международным участием в области трансформационных технологий, передовых новых материалов и междисциплинарных областей, и поэтому она возглавляет разработку нескольких стратегических передовых новых материалов на международном уровне. Лаборатория способствует развитию первоклассных исследовательских талантов во всем мире посредством передовых научных исследований в области материаловедения и технологий. Кроме того, лаборатория создала культуру международных совместных инноваций и провела международные совместные исследования по принципу «win-win», тем самым укрепив международное влияние, привлекательность и сплоченность лаборатории. Лаборатория добилась исторического прорыва по оценке ключевых государственных лабораторий в области материаловедения.

Сосредоточившись на общем видении и целях, лаборатория фокусируется на создании и разработке многокомпонентных, разномасштабных и многослойных композитных материалов и теории проектирования материалов, изучение которых строится на основных исследовательских платформах, включающих технологию градиентных композитных материалов, технологию изготовления композитных материалов «в момент образования», нанокомпозитную технологию и интегрированные инновации. В настоящее время проводятся исследования пяти ключевых материалов, в том числе передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и опорных отраслей, материалов для эффективного преобразования и хранения энергии для новых энергетических технологий, нанокомпозитных биоматериалов для естественных наук, информационных функциональных материалов для информационных технологий и передовых новых материалов для трансформационных технологий. Таким образом, лаборатория установила следующие пять отличительных направлений исследований: градиентная композитная технология и новые материалы, технология изготовления композитных материалов «в момент образования» и новые материалы, нанокомпозитная технология и новые материалы, преобразующая технология и передовые новые материалы, а также принципы композитных материалов и дизайн материалов.

В лаборатории работает активная и инновационная исследовательская группа, состоящая в основном из молодых исследователей и исследователей среднего возраста. 100 постоянных сотрудников, в том числе 1 академик Китайской академии наук, 2 академика Китайской инженерной академии, 1 академик Королевской академий наук и искусств Бельгии, 2 академика Европейской академии наук и искусств, 1 академик Австралийской инженерно-технологической академии, 1 академик Всемирной академии керамики, 12 исследователей национального уровня, 1 главный научный сотрудник Национальной программы «973», 5 стипендиатов национального фонда

«Outstanding Youth Science Fund» и 30 стипендиатов «Национального плана поддержки талантов» и т.д. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых, которые приезжают и проводят совместные исследования по всему миру в университетах и исследовательских институтах мирового уровня. В последние годы лаборатория направила несколько выдающихся молодых ученых в международные университеты мирового уровня более чем на один год для проведения совместных исследований.

Лаборатория делает упор на глобальный академический обмен и сотрудничество. За последние пять лет мы приняли на работу 25 зарубежных ученых в качестве почетных и приглашенных профессоров в основных областях исследований с целью создания благоприятных условий работы для всемирно известных ученых и проведения совместных исследований в лаборатории. Лаборатория наладила взаимовыгодное сотрудничество с Мичиганским университетом; Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA); Институтом материаловедения Университета Тохоку (Япония); Центром исследования материалов Оксфордского университета (Великобритания); Центром исследования композитов Калифорнийского университета (США) и Национальным институтом топливных элементов (Канада), а также с другими всемирно известными научно-исследовательскими учреждениями. Министерство науки и технологий создало «Международную совместную лабораторию передовых технологий синтеза и обработки материалов», которая является одной из первых 33 международных совместных лабораторий в Китае. Кроме того, Государственная администрация КНР по делам иностранных экспертов и Министерство образования совместно сформировали три научные базы, поддерживаемые Программой инноваций и развития талантов, а именно «Новые композитные материалы и передовые функциональные материалы», «Передовые технологии подготовки и прикладного проектирования новых функциональных тонкопленочных материалов» и «Инновации и таланты для увеличения срока службы композитов». Опираясь на эти важные платформы международного сотрудничества, лаборатория осуществила несколько ключевых государственных проектов с международным сотрудничеством и добилась плодотворных результатов.

В настоящее время площадь лаборатории составляет 25 тыс. 350 м^2, с оснащением современным оборудованием для синтеза и обработки материалов, а также самыми современными приборами для анализа структуры материалов, характеристики и тестирования производительности. Общая оценочная стоимость оснащения лаборатории составляет приблизительно 430 млн юаней.

Знакомство с Государственной ключевой лабораторией силикатных материалов для архитектуры

Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры получила одобрение для открытия Министерством науки и техники Китая (МНТК) в октябре 2011 года, а в июле 2013 года прошла экспертизу МНТК. Лаборатория развивает основные фундаментальные теории и общие ключевые технологические вопросы в процессе разработки и во время срока службы силикатных материалов для архитектуры, разрабатывает методы производства с низкой нагрузкой на окружающую среду и теории повышения энергоэффективности, исследует и разрабатывает высокоэффективные и многофункциональные строительные материалы для поддержки основных инженерных конструкций, разрабатывает экологически чистые, энергосберегающие и интеллектуальные строительные системы, а также предлагает новые теории, новые методы и основные ключевые технологии для достижения долгосрочной стабильности и переработки строительных материалов и конструкций.

Основными направлениями работы лаборатории являются исследования для снижения нагрузки на окружающую среду, функциональное проектирование и регулирование, исследования «поведения» материалов во время срока службы и принципы продления срока службы, а также переработка силикатных материалов для строительства.

Лаборатория занимает площадь 12 500 м^2 и оснащена профессиональным исследовательским оборудованием стоимостью более 100 миллионов юаней, образуя исследовательскую платформу, включающую восемь профессиональных вторичных лабораторий и один общественный экспериментальный центр. Исследовательская платформа имеет мощности для проведения исследований в области науки и техники теплового оборудования, цемента и вяжу-

щих материалов, бетона, стекла, керамики, пленок и покрытий, стеновых и дорожных материалов.

Лаборатория доступна как для китайских, так и для международных заявок и нацелена на внутренние и международные академические обмены и сотрудничество. На базе лаборатории была создана «Международная база научно-технического сотрудничества в области экологически чистых строительных материалов», которая в 2013 году была определена МНТК в качестве модели международной базы научно-технического сотрудничества.

Инновационные достижения научных исследований лаборатории вносят большой вклад в национальную экономику и социальное развитие, включая предоставление ключевой технической поддержки для строительства основной национальной инфраструктуры страны, стимулирование структурных преобразований и технологической модернизации традиционной промышленности строительных материалов, а также содействие внедрению стратегий энергосбережения и сокращению выбросов.

Знакомство с журналом Interdisciplinary Materials

Научный журнал Interdisciplinary Materials (ISSN: 2767-441X) был запущен Уханьским технологическим университетом совместно с John Wiley & Sons, Inc в декабре 2021 года.

Interdisciplinary Materials – это рецензируемый журнал открытого доступа с быстрой публикацией статей, фокусирующийся на междисциплинарных исследованиях между материаловедением и другими дисциплинами, такими как физика, химия, математика, механика, биология, энергетика, окружающая среда, информация, инженерия и т. д. Журнал стремится представлять информацию о передовых разработках в области науки и техники по всему миру.

Ожидается, что Interdisciplinary Materials будет использовать междисциплинарный, особый передовой и комплексный подход ко всем областям материаловедения, одновременно способствуя обмену идеями между учеными, занимающимися различными направлениями исследований. Аудитория журнала будет включать ученых-физиков, химиков, математиков, механиков, биологов, специалистов в области энергетики, окружающей среды, материаловедения, инженеров-теоретиков и практиков, а также политических деятелей.

Первый выпуск журнала вышел в свет в январе 2022 года. Журнал включен в базы данных Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex и Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Контактная информация

Уханьский технологический университет
430070, Китай, провинция Хубей, г. Ухань,
район Хунгшан, 122 Луоши Роуд,
Тел: 86-27-87884448; Факс: 86-27-87879466
E-mail: sklwut@whut.edu.cn
Контактные лица: Джао Сянг, Джоу Лихуа

R

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58

CC BY 4.0

Formulation of the actual state principle for a physical system

Boris V. Gusev[1], **Vasily V. Saurin**[2*]

[1] Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
[2] A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: saurin@ipmnet.ru

ABSTRACT

Introduction. The article briefly discusses the state of scientific research in the field of mathematical modeling of physical systems with distributed parameters. **Mathematical modeling in elasticity theory.** The initial boundary value problem of linear elasticity theory is formulated. It is shown that using measured and unmeasured variables, it is possible to construct a positive definite energy relationship, which allows not only to use the variational technique to find an approximate solution, but also to design objective estimates of its quality. **Two-dimensional problem of elasticity theory (static case).** Using the example of solving a two-dimensional static problem of linear elasticity, the advantages of the proposed approach are discussed in detail. **Mathematical modeling in fluid theory.** The variational principle in fluid theory is formulated. **Optimal pressure control.** Using the example of solving the problem of the motion control for ideal and viscous fluids in pipeline systems, the issues of finding an approximate solution and estimating its accuracy are discussed. **Energy principle in the heat transfer problem.** The variational principle in the linear heat transfer problem is formulated. **Two-dimensional heat transfer problem.** The features of constructing a solution to a control problem in a two-dimensional heat transfer theory are discussed in detail. **Generalizing principle.** A generalizing principle of the actual state of a physical system is formulated, which can be effectively applied for a detailed description and analysis of physical processes.

KEYWORDS: formulation of the initial boundary value problem, equations of state, energy principle

ACKNOWLEDGMENTS: The work was completed within the framework of the State assignment № 124012500437-9.

FOR CITATION:
Gusev B.V., Saurin V.V. Development of the actual state principle for a physical system. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(1):48–58. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58. – EDN: WHVNVU.

INTRODUCTION

The main idea of the approaches considered in this article is that the state variables used to describe a physical phenomenon can always be divided into two groups. The first group consists of the so-called measurable variables, the values of which can be directly measured using the necessary equipment. Such quantities include displacement, speed, temperature, etc. The second group represents unmeasured quantities; unlike the elements of the first group, the values of such variables cannot be obtained by direct measurement, but only indirectly using appropriate mathematical models. For example, stresses in a extended rod can be identified based on measured displacements and a mathematical model of an elastic rod. Such variables include stresses, impulses, heat flows, etc. At the same time, the governing equations can be divided into three groups. The first group includes the laws of balance and continuity. Initial and boundary conditions form the second group. The governing equations can be presented in the third group. The first type of equations reflects the influence of the environment on the system under consideration. The second describes the fundamental physical laws and hypotheses about the continuity of the environment. The defining relationships from the third group connect measurable and unmeasurable unknowns and contain information about the internal properties of the phenomenon being studied.

In physics, it is assumed that some of the governing equations are weakened in generalized formulations. The essence of the method of integro-differential relations,

© Gusev B.V., Saurin V.V., 2025

substantiated in the book [1], is that equations of the third type are considered in integral form, while the remaining equations must be exactly satisfied. For example, the initial-boundary value problem can be reduced to minimizing a non-negative functional with respect to all admissible variables. This modification was the starting point to develop the modern numerical methods for analyzing states, assessing the quality of solutions, and optimizing processes in the dynamics of solids. Note that this method is also applicable to other boundary and initial-boundary value problems of mathematical physics [3, 4].

MATHEMATICAL MODELING IN ELASTICITY THEORY

Let us present a more detailed consideration of the constitutive equations by groups using the example of the problem of linear elasticity. First, all constitutive equations in elasticity theory are composed of measurable variables $\mathbf{u}(t,x)$ – the displacement vector, which depends on time t and the spatial coordinate x, as well as unmeasurable variables $\boldsymbol{\sigma}(t,x)$ – the stress tensor (second-rank tensor) and $\mathbf{p}(t,x)$ – the momentum density vector. Second, the variables are chosen so that all energies, as quadratic forms, are written as direct products of the corresponding variables. The potential energy density $\pi_{\sigma u}$ has the form

$$\pi_{\sigma u} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2.1}$$

and the kinetic energy density k_{pu} can be represented as

$$k_{pu} = \frac{1}{2}\mathbf{p}\cdot\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}. \tag{2.2}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – the strain tensor can be represented as

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}\left(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}}\right) \tag{2.3}$$

a colon denotes the double tensor convolution operation, and a single dot denotes a simple scalar product.

The first group includes the equations of dynamic equilibrium (balance equation)

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = 0. \tag{2.4}$$

This equation relates only unmeasured variables, namely, stresses $\boldsymbol{\sigma}$ and impulses $\boldsymbol{p}$. However, the properties of the medium are not included in this relationship. These equations reflect the laws of balance and continuity.

The second group consists of the initial

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(x,t_0), \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \left.\frac{\partial \mathbf{u}(x,t)}{\partial t}\right|_{t=t_0}, \tag{2.5}$$

and from the boundary conditions

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1(x,t), \quad x\in\Gamma_1,$$
$$\boldsymbol{\sigma}\cdot\mathbf{n} = q_2(x,t), \quad x\in\Gamma_2, \tag{2.6}$$

and also special geometric constraints and also special geometric constraints (2.3). Here $\mathbf{u}_1(x,t)$ and $q_2(x,t)$ are given boundary functions, $\mathbf{n}$ is the vector of the outer normal to the boundary of the body and t_0 is the initial moment of time. These relations are determined by external conditions.

The third group includes equations of state that relate measurable and unmeasurable unknowns.

$$\mathbf{p} - \rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} = 0. \tag{2.7}$$

Note that only these equations contain information about the internal properties of the object under study.

Using relations (2.7), (2.1) and (2.2) it is possible to calculate the densities of potential and kinetic energies expressed relative to only measurable or unmeasurable variables. The measured unknown quantities can be represented as

$$\pi_{uu} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}, \quad k_{uu} = \frac{\rho}{2}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\cdot\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \tag{2.8}$$

and accordingly immeasurable

$$\pi_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{C}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}, \quad k_{pp} = \frac{1}{2\rho}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t}\cdot\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t}. \tag{2.9}$$

Note that calculating energies of this type is, generally speaking, not a trivial task. For example, if the problem is solved within the framework of nonlinear elasticity theory.

The initial-boundary value problem, modified in accordance with the variational approach [1], can be, for example, reduced to minimizing a quadratic non-negative (energy) functional with respect to all admissible variables.

Let us compose a quadratic form

$$\varphi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}\right) : \left(\mathbf{C}^{-1} : \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\varepsilon}\right) +$$
$$+ \frac{1}{2\rho}\left(\mathbf{p} - \rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right)\cdot\left(\mathbf{p} - \rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right). \tag{2.10}$$

In the book [1] it is shown that the energy functional Φ composed using this form (2.10) is always non-negative

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \int\limits_{\Omega\times T}\varphi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})\,d\Omega\,dt \geq 0, \tag{2.11}$$

if the displacement $\mathbf{u}$ and stress $\boldsymbol{\sigma}$ fields strictly satisfy the relations (2.3)–(2.6). Here $\Omega\times T$ is the space-time domain on which the problem is solved. The essence of this functional is that it consists of six different energies. Three of them constitute a quadratic relation, following from the

state equation, connecting stresses and deformations, and the other three follow from the relation with respect to the momentum and velocities of the body points. Using the notations introduced by (2.1), (2.2), (2.8) and (2.9), inequality (2.11) can be represented as

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} - 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0,$$
$$\Pi_{uu} = \int_{\Omega\times T} \pi_{uu} d\Omega dt, \quad \Pi_{\sigma\sigma} = \int_{\Omega\times T} \pi_{\sigma\sigma} d\Omega dt, \quad \Pi_{\sigma u} = \int_{\Omega\times T} \pi_{\sigma u} d\Omega dt,$$
$$K_{uu} = \int_{\Omega\times T} k_{uu} d\Omega dt, \quad K_{\sigma\sigma} = \int_{\Omega\times T} k_{\sigma\sigma} d\Omega dt, \quad K_{\sigma u} = \int_{\Omega\times T} k_{\sigma u} d\Omega dt. \quad (2.12)$$

In [1], a variational problem is studied in detail, in which the minimum of the functional (2.11) is determined under constraints (2.3)–(2.6), and it is proved that such a formulation is a variational principle. It can be shown that if all relations (2.3)–(2.7) are strictly satisfied, then the value of the functional (2.11) is identically equal to zero.

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) \equiv 0. \quad (2.13)$$

Usually, when solving the problem numerically, it is not possible to strictly satisfy condition (2.13). Such a discrepancy can be caused by a number of reasons. Firstly, the chosen numerical solution method does not allow finding an exact solution. Secondly, within the framework of the formulated problem, not all of the relations (2.3)–(2.7) can be strictly satisfied. This circumstance indicates some imperfection of the mathematical model. However, this energy approach allows us to estimate the accuracy of the numerical solution. For these purposes, various relative estimates of the quality of the approximate solution can be made. For example, the ratio of the functional Φ to the value of the potential energy $\Pi_{\sigma\sigma}$

$$\delta_\sigma = \Phi / \Pi_{\sigma\sigma}, \quad \Phi << \Pi_{\sigma\sigma} \quad (2.14)$$

can be successfully applied to evaluate not only the accuracy of the numerical solution, but also the imperfection of the mathematical model used.

TWO-DIMENSIONAL PROBLEM OF ELASTICITY THEORY (STATIC CASE)

As an example, consider the plane bending of a rectangular elastic plate (see Fig. 1) occupying the following region $\Omega = \{x\in(0,x_0), y\in(0,y_0)\}$. It is assumed that the homogeneous isotropic plate is loaded with some shear stress $q(y)$ distributed along the edge Γ_1 with coordinate $x = x_0$. The body is clamped along the edge Γ_3, where $x = 0$. The others edges Γ_2 and Γ_4 of the plates are free from loads. Thus, the boundary conditions have the form

$$u_1\big|_{x=0} = u_2\big|_{x=0} = 0,$$
$$\sigma_{22}\big|_{y=0} = \sigma_{yy}\big|_{y=y_0} = \sigma_{12}\big|_{y=0} = \sigma_{12}\big|_{y=y_0} = \sigma_{11}\big|_{x=0} = 0,$$
$$\sigma_{12}\big|_{x=x_0} = \frac{6q_0}{y_0^2}\left(y - \frac{y^2}{y_0^2}\right), \quad \int_0^{y_0} \sigma_{12}(x_0, y)dy = q_0. \quad (3.1)$$

The desired solution u and σ is approximated by polynomials given by the formulas

$$u_i = \sum_{k+l=0}^{N_u} u_i^{(kl)} x^k y^l, \quad i = 1,2,$$
$$\sigma_{ij} = \sum_{k+l=0}^{N_\sigma} \sigma_{ij}^{(kl)} x^k y^l, \quad i,j = 1,2, \quad (3.2)$$

where $u_i^{(kl)}$ and $\sigma_{ij}^{(kl)}$ are the unknown coefficients of the displacements and stresses components, respectively, N_u and N_σ are the degrees of the complete polynomial approximations u_i and σ_{ij}. It is believed that the degrees of the polynomials for displacements and stresses are related $N_u = N_\sigma + 1$.

Since the region occupied by the body is convex, the homogeneous equation for the displacements and the polynomial constraints on the stresses (3.2) together with the equilibrium condition (2.4) can be exactly satisfied without degeneracy of the approximations for the displacements and stresses in after an appropriate choice of the polynomials degrees N_u and N_σ.

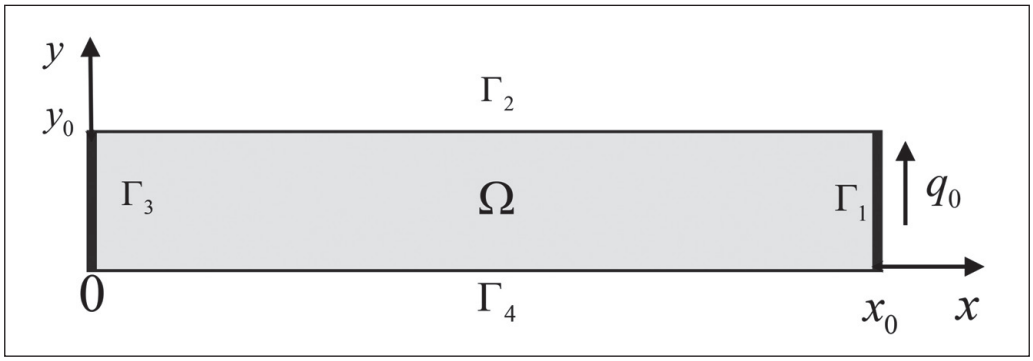


Fig. 1. Rectangular elastic plate

Taking into account (3.2), two-dimensional equilibrium equations can be represented by componentwise

$$\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{12}}{\partial y}=0,\quad \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{2}}{\partial y}=0,\quad x\in\Omega.. \qquad (3.3)$$

From equations (3.2) and (3.3). it follows that the coefficients $\sigma_{ij}^{(kl)}$ must obey linear relations

$$\begin{aligned}&(k+1)\sigma_{11}^{(k+1,l)}+(l+1)\sigma_{12}^{(k,l+1)}=0,\\&(k+1)\sigma_{12}^{(k+1,l)}+(l+1)\sigma_{22}^{(k,l+1)}=0,\\&0\le k+l\le N_{\sigma}-1.\end{aligned} \qquad (3.4)$$

The boundary conditions (3.2) are satisfied in a similar manner.

After satisfying the equilibrium equations (3.4) and the boundary conditions, the following unconstrained minimization problem arises: find a vector $\mathbf{a}^{*}\in R^{N}$ that minimizes the following functional

$$\Phi(u_i^{(kl)},\sigma_{ij}^{(kl)})=\Pi_{uu}+\Pi_{\sigma\sigma}-2\Pi_{\sigma u}\to\min_{\mathbf{a}\in R^{N}}. \qquad (3.5)$$

Since a static problem are consideried, kinetic energies do not enter into (3.5). Here $\mathbf{a}\in R^{N}$ is a vector of design parameters consisting of N independent coefficients $u_i^{(kl)}$ and $\sigma_{ij}^{(kl)}$, which remain in equations (3.4) and (3.2) after solving all equilibrium equations and boundary conditions.

After integration over the domain Ω, problem (3.5) is reduced to minimizing the corresponding quadratic form

$$\Phi(\mathbf{a})=\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\mathbf{a}-2(\mathbf{F})^{\mathrm{T}}\mathbf{a}\to\min_{\mathbf{a}\in R^{N}}. \qquad (3.6)$$

Here $\mathbf{K}\in R^{N\times N}$ is a symmetric and positive definite matrix and $\mathbf{F}\in R^{N}$ is a vector determined by the boundary surface forces. The vector **a** that minimizes the corresponding functionals is found as a solution to the linear system of equations:

$$\mathbf{K}\mathbf{a}=\mathbf{F}. \qquad (3.7)$$

The following dimensionless geometric and material parameters were chosen: plate length $x_0 = 1$ and height $y_0 = 1$, Young's modulus $E = 100$ and Poisson's ratio $v = 0.3$, external force $q_0=1$. The calculations were performed with various polynomial approximations of degree $N_\sigma = 8,...,16$.

The elastic energies Π_{uu}, $\Pi_{u\sigma}$, and $\Pi_{\sigma\sigma}$ are shown in Fig. 2. As can be seen from this figure, the approximate value Π_{uu} (solid line) of the elastic energy decreases monotonically with increasing order N_σ. In contrast, the values of the energies $\Pi_{u\sigma}$ and $\Pi_{\sigma\sigma}$ (dotted and dash-dotted curves, respectively) increase monotonically as the number N_σ increases. It can be concluded that the exact value of the elastic energy lies between the extreme lines.

This approach allows one to analyze explicitly the distribution of local errors. For this purpose, the energy residual density $\varphi/\Pi_{\sigma\sigma}$ from formula (2.10) can be used. As can be seen in Fig. 3, for the problem under consideration with $N_\sigma = 16$, this function has maximum values at the same points where the elastic energy density is concentrated. The function φ indicating the features of the solution can be used to refine and adapt the mesh in FEM procedures to improve the quality of the approximate solution.

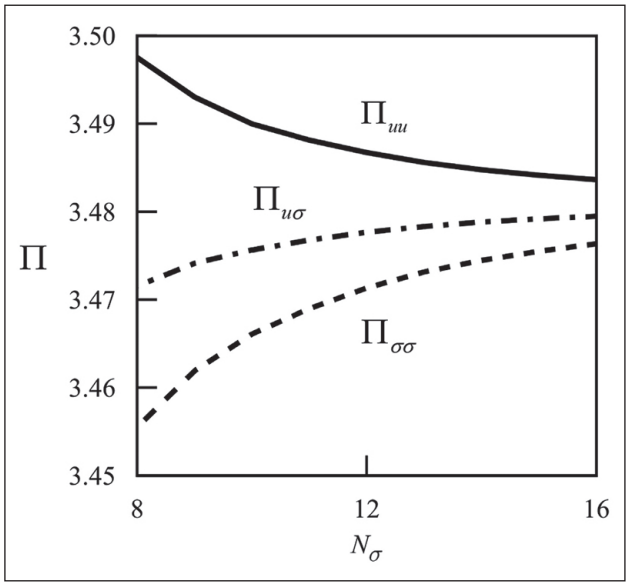


Fig. 2. Elastic energies Π_{uu}, $\Pi_{u\sigma}$, and $\Pi_{\sigma\sigma}$ as functions of the number of degrees of freedom N

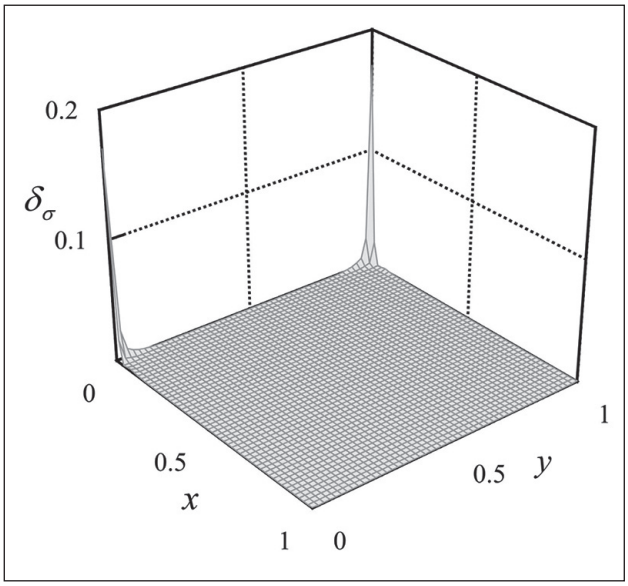


Fig. 3. Distribution of energy error φ over the region Ω

MATHEMATICAL MODELING IN FLUID THEORY

Supplying water to buildings under sufficient pressure is an important problem for modern life. Reliable control of numerous piping systems to consumers is required for comfortable and safe supply. Typical piping systems consist of several widely distributed elements, such as long pipe sections transporting water using several control pumps. Adequate mathematical models of piping dynamics, defined in terms of partial differential equations (PDE), must take into account distributed system characteristics, such as the compressibility of the medium and variations in fluid pressure and mass flow [5].

Let us consider a pipeline element consisting of a long straight section of pipe with transported liquid supplied by a control pump. One-dimensional motions of compressible viscous liquid inside a rigid cylindrical pipe are described in a Cartesian coordinate system with an axis directed along the central line of the pipeline with the origin at its left end cross-section.

It is assumed that the average fluid pressure in any section of the pipe $\tilde{p} = p_0 + p(t,x)$, as well as the mass flow rate of the fluid through this section $\tilde{q} = q_0 + q(t,x)$, do not deviate too much from their nominal values $p_0 > 0$ and q_0. In what follows, all system models and control procedures are derived in terms of excess pressure p and mass flow rate q. In the compressible fluid model, pressure is expressed as a linear function of excess bulk density according to

$$p = \frac{\kappa}{\rho_0}\rho(t,x), \tag{4.1}$$

where $\rho_0 = \text{const}$ is the nominal density of the liquid, and $\varkappa = \text{const}$ is the bulk modulus of elasticity.

The nominal average pressure in the pipeline system must be high enough to ensure the continuity of the liquid medium in accordance with

$$F\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \tag{4.2}$$

Here F is the cross-sectional area of the pipe.

Let us introduce an auxiliary function of effective displacements $w(t,x)$ that determines the distribution of excess bulk density $\rho(t,x)$ and mass flow $q(t,x)$ through

$$\rho = -\rho_0\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{and} \quad q = F\rho_0\frac{\partial w}{\partial t}. \tag{4.3}$$

It can be shown that the continuity condition is identically satisfied after substituting definition (4.3) for the volume density into (4.2). Eliminating the function ρ, the defining relations (4.1) and (4.3) can be represented as

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{p}{\kappa} = 0 \quad \text{and} \quad \eta = \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{q}{F\rho_0} = 0. \tag{4.4}$$

The equilibrium equation for the flow is defined as

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial Fp}{\partial x} + r(x,q,p) = 0, \tag{4.5}$$

Where r is the linear density of the fluid resistance forces in combination with external loads, such as gravity.

The boundary conditions are given by the expression

$$w(t,0) = \frac{1}{F\rho_0}\int_0^t u^0(\tau)d\tau \quad \text{and} \quad p(t,L) = u^1(t). \tag{4.6}$$

Finally, the initial conditions can be written as

$$w(0,x) = -\frac{1}{\rho}\int_0^x \rho(y)dy \quad \text{and} \quad q(0,x) = q^0(x). \tag{4.7}$$

The variables u^0 and u^1 are either given functions of time t or unknown control inputs.

By analogy with the methodology described in the previous paragraph, two types of variables can be distinguished. The measured variables include the effective displacement function $w(t,x)$, and the unmeasured variables include the mass flow function $q(t,x)$ and the fluid pressure $p(t,x)$. All equations given in this paragraph are divided into three groups. The first group includes the fluid flow equilibrium equations (4.5) and the continuity equation (4.2). The second group includes the boundary (4.6) and initial (4.7) conditions. The third group includes the equations of state (4.4) and (4.1). Note that equation (4.1) was used to exclude density.

Let us construct a quadratic form using the equations from (4.4),

$$\varphi(w,p,q) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{p}{\kappa}\right)\left(\kappa\frac{\partial w}{\partial x} + p\right) + \\ + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{q}{F\rho_0}\right)\left(F\rho_0\frac{\partial w}{\partial t} - q\right) \geq 0. \tag{4.8}$$

The positive definiteness of the form (4.8) follows directly from the positivity of the coefficients $\varkappa > 0$ and $F\rho_0 > 0$.

Integrating (4.8) over the length of the pipe and the duration of the time interval, we obtain

$$\Phi(w,p) = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} - 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0. \tag{4.9}$$

Here the notations for potential energies are introduced.

$$\Pi_{uu} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \kappa\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 dxdt, \; \Pi_{\sigma u} = -\frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T p\frac{\partial w}{\partial x}dxdt,$$

$$\Pi_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \frac{p^2}{\kappa}dxdt \tag{4.10}$$

and for kinetic energies

$$K_{uu} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T F\rho_0\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 dxdt,\ K_{\sigma u} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T q\frac{\partial w}{\partial x}dxdt,$$

$$K_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \frac{q^2}{F\rho_0}dxdt. \qquad (4.11)$$

It can be shown that if all relations (4.1)–(4.7) are strictly satisfied, then the value of the functional (4.9) is identically equal to zero.

$$\Phi(w,p)\equiv 0. \qquad (4.12)$$

This energy approach always allows us to estimate the imperfection of the constructed numerical solution. As in the previous paragraph, various relative quality estimates of the approximate solution can be constructed for these purposes. For example, we can limit ourselves, as in the previous case, to estimate (2.14).

OPTIMAL PRESSURE CONTROL

The problem of optimal pressure control is to find a control pressure as an input $u^*(t)$ to the system from a given set of controls U that transfers the pipeline system from the initial state (4.7) to the final equilibrium state with the desired pressure and mass flow distribution along the pipe in a fixed time T according to

$$p(T,x) = p_T(x),\quad q(T,x) = 0. \qquad (5.1)$$

Here p_T is the stationary distribution of the final pressure of the liquid. In this case, the objective function $J_0[u]$, which describes the effective residual energy of the entire system, must be minimized:

$$J_0[u]\to\min_{u\in U},\quad J_0 = E(T),\quad E(T) = \int_0^1 \psi(t,x)dx,$$

$$\psi = \frac{(p-p_T)^2+q^2}{2},\quad p_T = p_f + \kappa_0(1-x),$$

$$u(0) = 0,\quad u(T) = p_f. \qquad (5.2)$$

All relations are reduced to dimensionless form by substituting variables in accordance with

$$\tilde{x} = \frac{x}{l},\quad \tilde{t} = \frac{t}{\tau},\quad \tilde{w} = \frac{w}{l},\quad \tilde{q} = \frac{\tau q}{Al\rho_0},\quad \tilde{p} = \frac{p}{\kappa},$$

$$\tau = l\sqrt{\frac{\rho_0}{\kappa}},\quad \tilde{\kappa}_0 = \frac{l\kappa_0}{A\kappa},\quad \tilde{\kappa}_1 = \tau\kappa_1. \qquad (5.3)$$

In what follows, the tilde signs are omitted in all equations.

To develop an optimal control law, we consider a polynomial input control as

$$u\in U = u:\quad u(t) = \left\{\frac{p_f t}{T} + \frac{t-T}{T}\sum_{k=1}^{K}\frac{u_k t^k}{T^k}\right\},$$

$$u(0) = 0,\quad u(T) = p_f. \qquad (5.4)$$

After solving the initial boundary value problem described by the functional (4.9), using the method discussed in detail in Section 2, the solution is found for uncertain components of the vector $\boldsymbol{u} = \{u_1,\ldots,u_k\}$ of control parameters. The resulting vector functions $\tilde{\mathbf{w}}(t,\mathbf{u})$ and $\tilde{\mathbf{q}}(t,\mathbf{u})$ are used to minimize the modified objective function

$$J_1(\mathbf{u})\to\min_{\mathbf{u}},\quad J_1 = \tilde{J}_0(\mathbf{u}) + \frac{\gamma}{T}\Phi(\mathbf{u}), \qquad (5.5)$$

where the additive term with a dimensionless weighting coefficient γ affects the numerical value of the optimal solution conditionality. The tilde symbol in (5.5) means that the corresponding functionals are expressed through the solutions $\tilde{\mathbf{w}}$, $\tilde{\mathbf{q}}$ after substituting them for the optimal values. The vector $\mathbf{u}^*$, obtained as a result of finding the optimal control function $u^*(t) = u(t, \mathbf{u}^*)$, is used for subsequent numerical simulations.

To demonstrate the efficiency of the optimization algorithm, two controlled processes in a pipeline system are considered. The first process corresponds to the flow of an ideal fluid in a homogeneous sealed pipe without resistance ($\varkappa_0 = \varkappa_1 = 0$). In the second process, the fluid flow is characterized by a constant and viscous resistance with system coefficients ($\varkappa_0 = \varkappa_1 = 1$). The control parameters $T = 4$, $p_f = 1$, $K = 9$, $\gamma = 10$, are used for all examples in this section.

The time diagram of the optimal pressure control $u^*(t)$ is shown in Fig. 4 for both processes. The control laws for

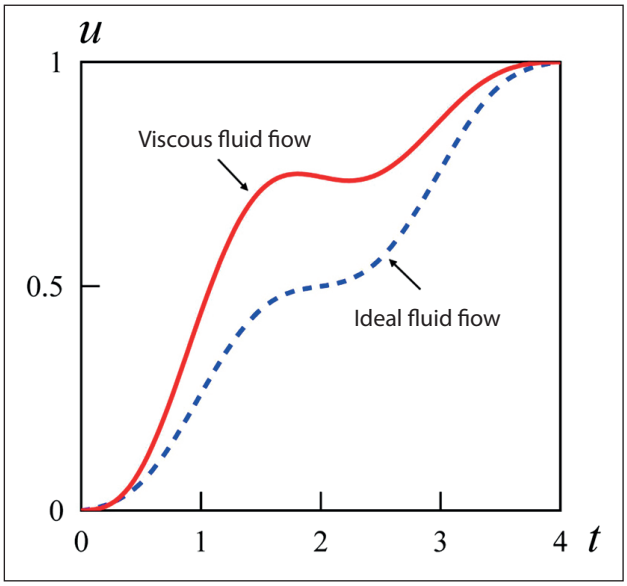


Fig. 4. Optimum boundary pressure

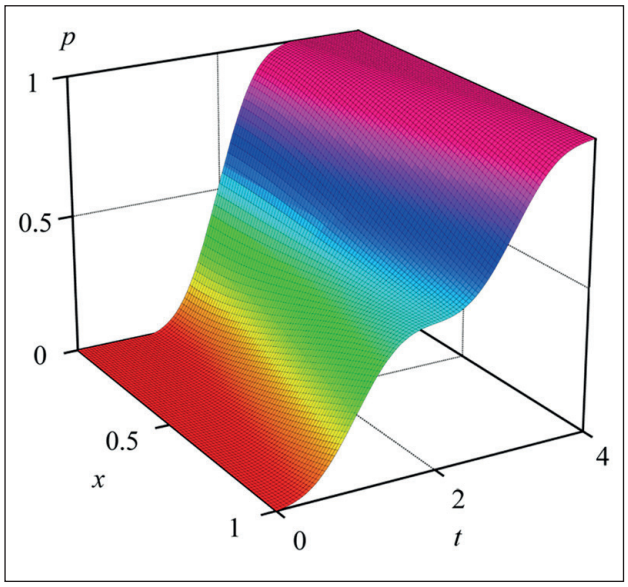


Fig. 5. Pressure distribution for an ideal fluid flow

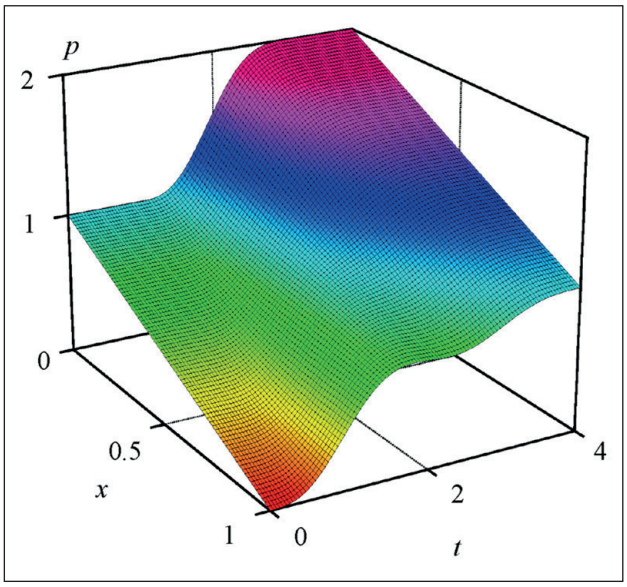


Fig. 6. Pressure distribution for a viscous fluid flow

the ideal and viscous fluids are shown in this figure by the dotted and solid curves, respectively. It is seen that the optimal pressure control is higher if the resistance along the pipe is taken into account. In addition, the monotonic nature of the control function is violated in the case of a viscous fluid.

Figure 5 and Figure 6 show the fluid pressure distributions for both ideal and viscous fluids in space and time. Note that the proposed control strategy allows us to transfer systems from their initial states to a close neighborhood of specified final pressure distributions $p_\tau(x)$ in such a way that undesirable oscillations are prevented.

The value of the cost function defined in (5.2) is $J_0 = 9.6 \cdot 10^{-8}$ for an ideal fluid. The relative integral error introduced in (2.14) is quite small for this approximation: $\delta_\sigma = 1.6 \cdot 10^{-9}$. For the model with viscous drag, these values are significantly smaller than those obtained for an ideal fluid and are equal to $J_0 = 3.9 \cdot 10^{-10}$ and $\delta_\sigma = 7.1 \cdot 10^{-11}$, respectively. This means that viscosity in a linear fluid model can be a valuable factor in improving the quality of approximate solutions. Moreover, it helps to reduce the intensity of residual oscillations.

ENERGY PRINCIPLE IN THE HEAT TRANSFER PROBLEM

Let us consider the process of heat transfer in two spatial coordinates in a rectangular plate with dimensions a and b. The law of heat flux transfer (Fourier's law) relates the heat flux density vector

$$q = [q_y(y,z,t), q_z(y,z,t)] = \\ = [\sqrt{\theta_a}\,\overline{q}_y(y,z,t), \sqrt{\theta_a}\,\overline{q}_z(y,z,t)] \qquad (6.1)$$

and temperature gradient:

$$\begin{cases} q_y + \lambda \dfrac{\partial \theta}{\partial y} = \overline{q}_y + \lambda \dfrac{\partial \overline{\theta}}{\partial y} = 0 \\ q_z + \lambda \dfrac{\partial \theta}{\partial z} = \overline{q}_z + \lambda \dfrac{\partial \overline{\theta}}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad \{y, z, t\} \in \Omega \times \{0, T\},$$

$$\Omega = (-a/2, a/2) \times (-b/2, b/2). \qquad (6.2)$$

Here temperature is denoted as $\theta(y,z,t)$ and λ is the thermal conductivity coefficient. In order to use the methodology described in the previous paragraphs, new variables $q_y = \tilde{q}_y$, $q_z = \tilde{q}_z$, $\theta = \sqrt{\theta_a}\,\theta$, are introduced into these equations. As can be seen, such a replacement does not change the form of equations (6.2). Here θ_a is the ambient temperature.

The first law of thermodynamics leads to

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{\alpha}{h}\theta + \mu(y,z,t) = 0, \qquad (6.3)$$

where ρ is the bulk density of the plate material, c_p is the specific heat capacity, α is the convective heat transfer coefficient, and h is the plate thickness. The function $\mu(y,z,t)$ represents both distributed control and external disturbances.

In terms of heat flux densities q_y and q_z boundary conditions are given as

$$q_y(y, \pm b/2, t) = 0, \quad q_z(\pm a/2, x, t) = 0. \qquad (6.4)$$

To complete the formulation of the initial boundary value problem, we define the initial temperature distribution

$$\theta(y, z, 0) = \theta_0(y, z). \quad (6.5)$$

In complete analogy with the case of linear elasticity considered in the previous section, the heat transfer equations (6.2) – (6.5) can be combined into three groups by introducing a new function r_q in such a way that equation (6.3) takes the form

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + r_q(y, z, t) = 0, \quad (6.6)$$

where

$$r_q + \kappa_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} - \kappa_2 \theta - \mu = r_q + \kappa_1 r_\theta. \quad (6.7)$$

Here, for convenience, new parameters $\varkappa_1 = \rho c_p$, $\varkappa_2 = 2\alpha/h = h$, and $r_\theta = \partial\theta/\partial t - \varkappa_2\theta/\varkappa_1\mu/\varkappa_1$, are introduced. Explicit indication of the initial and boundary conditions for r_q is not required, since they are already completely determined by equations (6.4) and (6.5).

Thus, equation (6.6) is included in the first group of equations. This is an analogue of the equilibrium equation (2.4). The boundary (6.4) and initial (6.5) conditions belong to the second group. Relations (6.2) and (6.7) constitute the third group of equations, and only these relations contain information about the properties of the material.

By analogy with the initial-boundary value problem (2.4)–(2.7), it is important to consider the quadratic values of the defining relations (6.2) and (6.7). The discrepancy in the assignment of potential (thermal) energy, which follows from (6.7), can be represented in the form

$$\Phi_W = W_{uu} - 2W_{u\sigma} + W_{\sigma\sigma} =$$

$$= \int_{\Omega\times T} \left(r_q + \kappa_1 r_\theta\right)\left(\frac{r_q}{\kappa_1} + r_\theta\right) d\Omega dt \geq 0 \quad (6.8)$$

From relation (6.2) one can formulate the discrepancy in the assignment of kinetic energy (heat flow).

$$\Phi_K = K_{uu} - 2K_{u\sigma} + K_{\sigma\sigma} =$$

$$= \int_{\Omega\times T} \left\{\left(\overline{q}_y + \lambda\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial y}\right)\left(\frac{\overline{q}_y}{\lambda} + \frac{\partial\overline{\theta}}{\partial y}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(\overline{q}_z + \lambda\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}\right)\left(\frac{\overline{q}_z}{\lambda} + \frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}\right)\right\} d\Omega dt \geq 0. \quad (6.9)$$

Thus, from (6.8) and (6.9) it follows

$$\Phi(\theta, q) = \Phi_W + \Phi_K = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} -$$

$$- 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0. \quad (6.10)$$

Then, if all relations (6.2)–(6.7) are strictly satisfied, then the value of the functional (6.10) is identically equal to zero.

$$\Phi(\theta, q) \equiv 0. \quad (6.11)$$

As in the previous cases, this approach allows us to estimate the imperfection of the constructed numerical solution. For these purposes, we can construct various relative estimates of the quality of the approximate solution. For example, we can limit ourselves, as in the previous case, to estimate (2.14).

TWO-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER PROBLEM

Consider a rectangular metal plate, shown in Fig. 7. There is a set of geometric and physical parameters of the system that are used in modeling. The dimensions of the plate are shown in this figure.

The physical parameters of the plate are as follows:

$$\lambda = 110\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}, \quad \rho = 2700\ \text{кг}\cdot\text{м}^{-3},$$
$$\text{c}_\text{p} = 896\ \text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}, \quad \alpha = 60\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}. \quad (7.1)$$

The parameters of this model were determined in a series of experiments.

In terms of heat flux density, the boundary conditions are given by the expression

$$y = \pm\frac{a}{2}: \quad q_z = 0; \quad z = \pm\frac{b}{2}: \quad q_y = 0. \quad (7.2)$$

It is assumed that all sides of the plate are adiabatically insulated. Thermal action (control) on the plate is carried out using Peltier elements in combination with cooling devices (colored areas in the figure). Note that this type of control action can be taken into account by the function $\mu(y,z,t)$ in equation (6.3). If $\mu > 0$, then this is a heating process. If $\mu < 0$ – cooling.

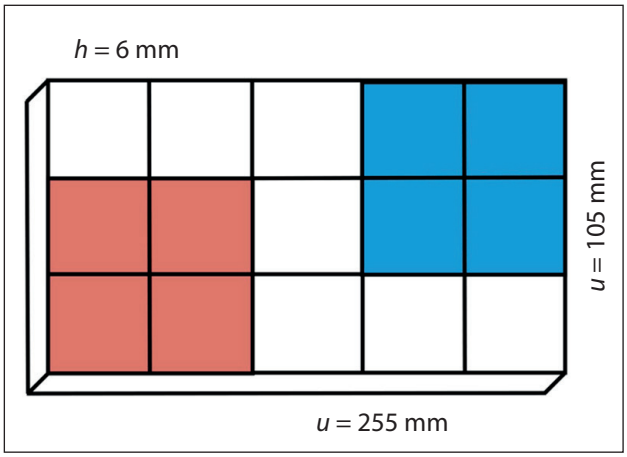


Fig. 7. Schematic diagram of the experimental setup

The two control inputs are considered to be located on the colored parts of the plate. The lower part of the plate corresponds to the place where the plate is heated by the Peltier element with intensity $\mu_1(y,z,t) = 60W/(abh)$. The upper part of the plate is cooled with $\mu_2(y,z,t) = 30W/(abh)$.

To take into account the discontinuous control function $\mu(y,z,t)$, a finite element scheme has been developed, shown in Fig. 8, based on a four-node quadrangular element. The interelement conditions (continuity) on each adjacent element have the form

$$\theta_1 = \theta_2, \quad q_y^1 = q_y^2, \quad q_z^1 = q_z^2. \tag{7.3}$$

Polynomial approximations of the unknown functions of temperature and heat flux are given for each element in the following form

$$\theta = \sum_{k+1}^{N} \theta^{(kl)}(t) y^k z^l,$$

$$q_y = \sum_{k+1}^{N+1} q_y^{(kl)}(t) y^k z^l,$$

$$q_z = \sum_{k+1}^{N+1} q_z^{(kl)}(t) y^k z^l. \tag{7.4}$$

Satisfaction of boundary conditions (7.2) using approximation (7.4) makes it possible to construct a system of ordinary differential equations for the time-dependent functions defined in equation (7.2). To construct a sequential differential problem, it is necessary to take into account the initial conditions (6.5).

The effectiveness of the proposed approach is illustrated in Fig. 9, which shows the temperature profiles. These time-dependent functions are calculated at points O_1 and O_2 (shown in Fig. 8) and are represented by red and blue lines, respectively.

The increase in the accuracy of numerical solutions with an increase in the degree of the approximation polynomial is shown in Fig. 10 as an example of the change in the relative error δ_σ given in (2.14) and expressed as a percentage.

GENERALIZING PRINCIPLE

Any physical system is described by measurable and unmeasurable variables that satisfy boundary and initial conditions, as well as equilibrium equations, and are related to each other by governing equations.

Potential and kinetic energies in a system can be expressed in terms of measurable variables $\Pi_u(\mathbf{u})$, $T_u(\mathbf{u})$, unmeasurable quantities $\Pi_\sigma(\mathbf{u})$, $T_\sigma(\mathbf{u})$, and mixed energies $\Pi_{u\sigma}(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})$, $T_{u\sigma}(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})$. Then the true state of the physical system is achieved when the linear energy relation is strictly satisfied

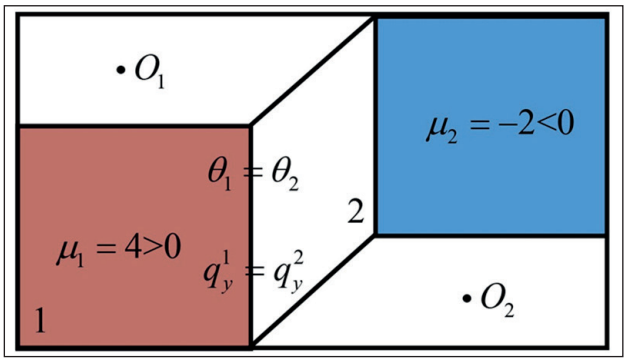


Fig. 8 Finite element mesh and interelement conditions

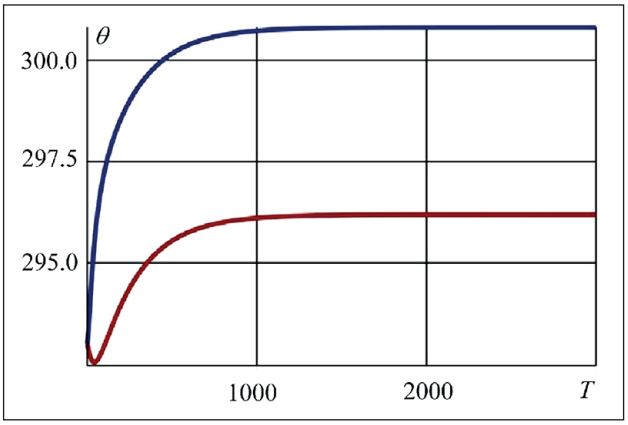


Fig. 9 Temperature profiles at points O_1 (upper curve) and O_2 (lower curve)

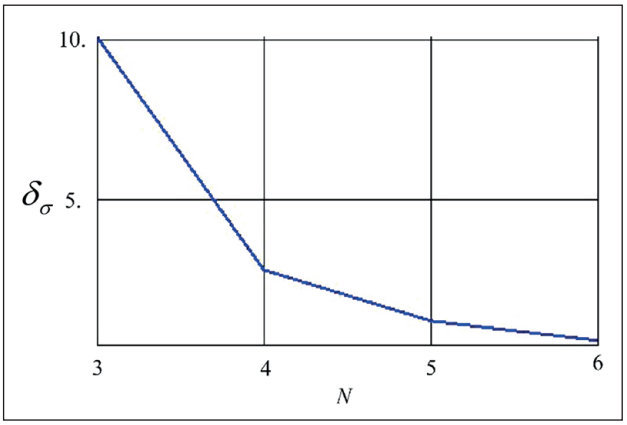


Fig. 10. Relative error δ_σ with respect to the degree of approximation N

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \Pi_u + \Pi_\sigma - 2\Pi_{u\sigma} + T_u + T_\sigma - 2T_{u\sigma} = 0. \tag{8.1}$$

If the value of the functional (8.1) is not equal to zero, then the relative assessment of the accuracy of the approximate solution of the physical problem is equal to:

$$\delta_{\sigma u} = \Phi / \Pi_{\sigma u}, \quad \Phi << \Pi_{\sigma u}. \tag{8.2}$$

REFERENCES

1. Kostin G.V. and Saurin V.V., (2012). Integrodifferential relations in linear elasticity, 280 p. De Gruyter, Berlin.
2. Gusev B.V., Saurin V.V. Approaches and principles of mathematical modeling in structural mechanics // Industrial and civil construction. – 2023. – № 11. – P. 86–90.
3. Gusev B.V., Saurin V.V. Duality ideas in mathematical modeling // Prospective tasks of engineering science: Collection of articles of the XIV International scientific forum. – Engineering center Impulse LLC, Federal state budgetary educational institution of higher education A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art) Moscow: 2023.
4. Aschemann H., Kostin G.V., Saurin V.V. (2016). Multivariable trajectory tracking control for a heated rod based on an integro-differential approach to control-oriented modeling. In Proceedings of MMAR 2016, Poland, IEEE. Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advances in Heat Transfer. 1977. V. 13. P. 119–203. https://doi.org/10/1109/MMAR.2016.7575218
5. Kostin G.V., Saurin V.V., Aschemann H., and others (2016). Integrodifferential approaches to frequency analysis and control design for compressible fluid flow in a pipeline element. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2014 Vol. 20, No. 5, 504–527. https://doi.org/10.1080/13873954.2013.842595

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris V. Gusev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member Russian Academy of Sciences, Professor of the Department «Construction Materials and Technologies», Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia info-rae@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2718-9539

Vasily V. Saurin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, saurin@ipmnet.ru, https://orcid.org/0000-0001-9349-6890

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Boris V. Gusev – scientific supervision; development of the concept and development of the research methodology; drawing up final conclusions.

Vasily V. Saurin – processing and analysis of experimental data; presentation of research results; writing the original text of the article; drawing up interim conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 25.12.2024; approved after reviewing 03.02.2025; accepted for publication 06.02.2025.

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES

Научная статья / Original article
УДК 531.3
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58

CC BY 4.0

Формулировка принципа действительного состояния физической системы

Борис Владимирович Гусев[1], **Василий Васильевич Саурин**[2]*

[1] Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия
[2] Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: saurin@ipmnet.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Кратко обсуждается состояние научных исследований в области математического моделирования физических систем с распределенными параметрами. **Математическое моделирование в теории упругости.** Сформулирована начально краевая задача линейной теории упругости. Показано, что с использованием измеряемых и неизмеряемых переменных можно составить положительно определенное энергетическое соотношение, которое позволяет не только использовать вариационную технику для нахождения приближенного решения, но и строить объективные оценки его качества. **Двумерная задача теории упругости (статический случай).** На примере решения двумерной статической задачи линейной упругости детально обсуждаются преимущества предлагаемого подхода. **Математическое моделирование в теории жидкости.** Сформулирован вариационный принцип в теории жидкости. **Оптимальное управление давлением.** На примере решения задачи управления движением идеальной и вязкой жидкости в трубопроводных системах обсуждаются вопросы нахождения приближенного решения и оценки его точности. **Энергетический принцип в задаче теплопереноса.** Сформулирован вариационный принцип в линейной задаче теплопереноса. **Двумерная задача теплопереноса.** Подробно обсуждены особенности построения решения задачи управления в двумерной теории теплообмена. **Обобщающий принцип.** Сформулирован обобщающий принцип действительного состояния физической системы, который может быть эффективно применен для детального описания и анализа физических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: формулировка начально-краевой задачи, уравнения состояния, энергетический принцип

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках Госзадания № 124012500437-9.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Гусев Б.В., Саурин В.В. Разработка принципа действительного состояния физической системы. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):48–58. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58. – EDN: WHVNVU.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья / Original article
УДК 531.3
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58

CC BY 4.0

Формулировка принципа действительного состояния физической системы

Борис Владимирович Гусев[1], **Василий Васильевич Саурин**[2]*

[1] Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия
[2] Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: saurin@ipmnet.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Кратко обсуждается состояние научных исследований в области математического моделирования физических систем с распределенными параметрами. **Математическое моделирование в теории упругости.** Сформулирована начально краевая задача линейной теории упругости. Показано, что с использованием измеряемых и неизмеряемых переменных можно составить положительно определенное энергетическое соотношение, которое позволяет не только использовать вариационную технику для нахождения приближенного решения, но и строить объективные оценки его качества. **Двумерная задача теории упругости (статический случай).** На примере решения двумерной статической задачи линейной упругости детально обсуждаются преимущества предлагаемого подхода. **Математическое моделирование в теории жидкости.** Сформулирован вариационный принцип в теории жидкости. **Оптимальное управление давлением.** На примере решения задачи управления движением идеальной и вязкой жидкости в трубопроводных системах обсуждаются вопросы нахождения приближенного решения и оценки его точности. **Энергетический принцип в задаче теплопереноса.** Сформулирован вариационный принцип в линейной задаче теплопереноса. **Двумерная задача теплопереноса.** Подробно обсуждены особенности построения решения задачи управления в двумерной теории теплообмена. **Обобщающий принцип.** Сформулирован обобщающий принцип действительного состояния физической системы, который может быть эффективно применен для детального описания и анализа физических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: формулировка начально-краевой задачи, уравнения состояния, энергетический принцип

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках Госзадания № 124012500437-9.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Гусев Б.В., Саурин В.В. Разработка принципа действительного состояния физической системы. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):48–58. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58. – EDN: WHVNVU.

Formulation of the actual state principle for a physical system

Boris V. Gusev[1], **Vasily V. Saurin**[2]*

[1] Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
[2] A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: saurin@ipmnet.ru

ABSTRACT

Introduction. The article briefly discusses the state of scientific research in the field of mathematical modeling of physical systems with distributed parameters. **Mathematical modeling in elasticity theory.** The initial boundary value problem of linear elasticity

© Гусев Б.В., Саурин В.В., 2025

theory is formulated. It is shown that using measured and unmeasured variables, it is possible to construct a positive definite energy relationship, which allows not only to use the variational technique to find an approximate solution, but also to design objective estimates of its quality. **Two-dimensional problem of elasticity theory (static case).** Using the example of solving a two-dimensional static problem of linear elasticity, the advantages of the proposed approach are discussed in detail. **Mathematical modeling in fluid theory.** The variational principle in fluid theory is formulated. **Optimal pressure control.** Using the example of solving the problem of the motion control for ideal and viscous fluids in pipeline systems, the issues of finding an approximate solution and estimating its accuracy are discussed. **Energy principle in the heat transfer problem.** The variational principle in the linear heat transfer problem is formulated. **Two-dimensional heat transfer problem.** The features of constructing a solution to a control problem in a two-dimensional heat transfer theory are discussed in detail. **Generalizing principle.** A generalizing principle of the actual state of a physical system is formulated, which can be effectively applied for a detailed description and analysis of physical processes.

KEYWORDS: formulation of the initial boundary value problem, equations of state, energy principle

ACKNOWLEDGMENTS: The work was completed within the framework of the State assignment № 124012500437-9.

FOR CITATION:
Gusev B.V., Saurin V.V. Development of the actual state principle for a physical system. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):48–58. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-48-58. – EDN: WHVNVU.

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная идея рассматриваемых в данной статье подходов заключается в том, что переменные состояния, которые используются для описания физического явления, всегда можно условно разделить на две группы. Первая группа состоит из так называемых измеряемых переменных, значения которых можно непосредственно измерить с использованием необходимого оборудования. К таким величинам относятся перемещение, скорость, температура и т. д. Вторая группа представляет неизмеряемые величины, в отличие от элементов первой группы значения таких переменных нельзя получить непосредственным измерением, а только косвенно с использованием соответствующих математических моделей. Например, напряжения в растянутом стержне можно идентифицировать на основе измеренных перемещений и математической модели упругого стержня. К таким переменным относятся напряжения, импульсы, тепловые потоки и т. д. В то же время определяющие уравнения можно разделить на три группы. В первую группу входят законы баланса и непрерывности. Начальные и граничные условия образуют вторую группу. Определяющие уравнения могут быть представлены в третьей группе. Первый тип уравнений отражает влияние окружающей среды на рассматриваемую систему. Второй описывает фундаментальные физические законы и гипотезы о непрерывности среды. Определяющие соотношения из третьей группы связывают измеряемые и неизмеряемые неизвестные и содержат информацию о внутренних свойствах изучаемого явления.

В физике предполагается, что некоторые из определяющих уравнений ослабляются в обобщенных формулировках. Суть метода интегродифференциальных соотношений, обоснованного в книге [1], заключается в том, что уравнения третьего типа рассматриваются в интегральной форме, тогда как остальные уравнения должны быть точно удовлетворены. Например, начально-краевая задача может быть сведена к минимизации неотрицательного функционала относительно всех допустимых переменных. Такая модификация явилась стартовой точкой для разработки современных численных методов анализа состояний, оценки качества решений и оптимизации процессов в динамике твердых тел. Отметим, что этот метод применим и к другим краевым и начально-краевым задачам математической физики [3, 4].

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Представим более детально рассмотрение определяющих уравнений по группам на примере задачи линейной упругости. Во-первых, все определяющие соотношения в теории упругости составлены из измеряемых переменных $\mathbf{u}(t,x)$ – вектора перемещений, зависящего от времени t и пространственной координаты x, а также неизмеряемых $\boldsymbol{\sigma}(t,x)$ – тензора напряжений (тензора второго ранга) и $\mathbf{p}(t,x)$ – вектора плотности количества движения. Во-вторых, переменные выбраны так, что все энергии как квадратичные формы записываются в виде прямых произведений соответствующих переменных. Плотность потенциальной энергии $\pi_{\sigma u}$ имеет вид

$$\pi_{\sigma u} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}, \qquad (2.1)$$

а плотность кинетической энергии k_{pu} может быть представлена как

$$k_{pu} = \frac{1}{2}\mathbf{p}\cdot\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}. \quad (2.2)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформаций может быть представлен в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}\left(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}}\right), \quad (2.3)$$

двоеточием обозначена операция двойной тензорной свертки, одной точкой обозначено простое скалярное произведение.

К первой группе отнесем уравнения динамического равновесия (уравнение баланса)

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = 0. \quad (2.4)$$

Это уравнение связывает между собой только неизмеряемые переменные, а именно напряжения $\boldsymbol{\sigma}$ и импульсы $\boldsymbol{p}$. При этом свойства среды в это соотношение не входят. Эти уравнения отражают законы баланса и непрерывности.

Вторая группа состоит из начальных

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(x,t_0), \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \left.\frac{\partial \mathbf{u}(x,t)}{\partial t}\right|_{t=t_0}, \quad (2.5)$$

и из граничных условий

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1(x,t), \quad x\in\Gamma_1,$$
$$\boldsymbol{\sigma}\cdot\mathbf{n} = q_2(x,t), \quad x\in\Gamma_2, \quad (2.6)$$

а также специальных геометрических ограничений (2.3). Здесь $\mathbf{u}_1(x,t)$ и $q_2(x,t)$ – заданные граничные функции, $\mathbf{n}$ – вектор внешней нормали к границе тела и t_0 – начальный момент времени. Эти соотношения определяются внешними условиями.

К третьей группе можно отнести уравнения состояния, связывающие измеряемые и неизмеряемые неизвестные

$$\mathbf{p} - \rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon} = 0. \quad (2.7)$$

Заметим, что только эти уравнения содержат информацию о внутренних свойствах исследуемого объекта.

Используя соотношения (2.7), (2.1) и (2.2), можно вычислить плотности потенциальной и кинетической энергий, выраженных относительно только измеряемых или неизмеряемых переменных. Измеряемые неизвестные величины могут быть представлены в виде

$$\pi_{uu} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}:\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}, \quad k_{uu} = \frac{\rho}{2}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\cdot\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (2.8)$$

и соответственно неизмеряемые

$$\pi_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}:\mathbf{C}^{-1}:\boldsymbol{\sigma}, \quad k_{pp} = \frac{1}{2\rho}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t}\cdot\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Отметим, что вычисление энергий такого типа, вообще говоря, задача не тривиальная. Например, в случае, если решается задача в рамках нелинейной теории упругости.

Начально-краевая задача, модифицированная в соответствии с вариационным подходом [1], может быть, например, сведена к минимизации квадратического неотрицательного (энергетического) функционала относительно всех допустимых переменных.

Составим квадратичную форму

$$\varphi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\sigma}-\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}\right):\left(\mathbf{C}^{-1}:\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\varepsilon}\right) +$$
$$+\frac{1}{2\rho}\left(\mathbf{p}-\rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right)\cdot\left(\mathbf{p}-\rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right). \quad (2.10)$$

В книге [1] показано, что энергетический функционал Ф, составленный с использованием этой формы , всегда неотрицателен

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \int\limits_{\Omega\times T}\varphi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})d\Omega dt \geq 0, \quad (2.11)$$

если поля перемещений $\mathbf{u}$ и напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ строго удовлетворяют соотношениям (2.3)–(2.6). Здесь $\Omega\times T$ – пространственно-временная область, на которой решается задача. Суть этого функционала состоит в том, он состоит из шести различных энергий. Три из них составляют квадратичное соотношение, вытекающее из уравнения состояния, связывающее напряжения и деформации, а три другие вытекают из соотношения относительно количества движения и скоростей точек тела. Используя обозначения, введенные формулами (2.1), (2.2), (2.8) и (2.9), неравенство (2.11) может быть представлено в виде

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} - 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0,$$
$$\Pi_{uu} = \int\limits_{\Omega\times T}\pi_{uu}d\Omega dt, \quad \Pi_{\sigma\sigma} = \int\limits_{\Omega\times T}\pi_{\sigma\sigma}d\Omega dt, \quad \Pi_{\sigma u} = \int\limits_{\Omega\times T}\pi_{\sigma u}d\Omega dt,$$
$$K_{uu} = \int\limits_{\Omega\times T}k_{uu}d\Omega dt, \quad K_{\sigma\sigma} = \int\limits_{\Omega\times T}k_{\sigma\sigma}d\Omega dt, \quad K_{\sigma u} = \int\limits_{\Omega\times T}k_{\sigma u}d\Omega dt. \quad (2.12)$$

В [1] подробно исследована вариационная задача, в которой определяется минимум функционала (2.11) при ограничениях (2.3)–(2.6) и доказано, что такая формулировка является вариационным принципом. Можно показать, что, если все соотношения (2.3)–(2.7) строго выполняются, тогда значение функционала (2.11) тождественно равно нулю

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) \equiv 0. \quad (2.13)$$

Обычно при численном решении задачи не удается строго выполнить условие (2.13). Такое несоответствие может быть вызвано рядом причин. Во-первых, выбранный численный метод решения не позволяет найти точное решение. Во-вторых, в рамках сформулированной задачи не все из соотношений (2.3)–(2.7) могут быть строго выполнимы. Это обстоятельство указывает на некоторое несовершенство математической модели. Однако данный энергетический подход позволяет оценить точность численного решения. Для этих целей можно составить разнообразные относительные оценки качества приближенного решения. Например, отношение функционала Ф к значению потенциальной энергии $\Pi_{\sigma\sigma}$

$$\delta_\sigma = \Phi / \Pi_{\sigma\sigma}, \quad \Phi << \Pi_{\sigma\sigma} \tag{2.14}$$

может быть успешно применено для того, чтобы оценить не только точность численного решения, но и совершенство используемой математической модели.

3. ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ (СТАТИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ)

В качестве примера рассмотрим плоский изгиб прямоугольной упругой пластины (см. рис. 1), занимающую следующую область $\Omega = \{x \in (0,x_0), y \in (0,y_0)\}$. Предполагается, что однородная изотропная пластина нагружена некоторым напряжением сдвига $q(y)$, распределенным по краю Γ_1 с координатой $x = x_0$. Тело защемлено вдоль края Γ_3, где $x = 0$. Остальные ребра Γ_2 и Γ_4 пластины свободны от нагрузок. Таким образом, граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned}
&u_1\big|_{x=0} = u_2\big|_{x=0} = 0,\\
&\sigma_{22}\big|_{y=0} = \sigma_{yy}\big|_{y=y_0} = \sigma_{12}\big|_{y=0} = \sigma_{12}\big|_{y=y_0} = \sigma_{11}\big|_{x=0} = 0,\\
&\sigma_{12}\big|_{x=x_0} = \frac{6q_0}{y_0^2}\left(y - \frac{y^2}{y_0^2}\right), \quad \int_0^{y_0} \sigma_{12}(x_0, y)dy = q_0.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Искомое решение u и σ аппроксимируется полиномами, даваемыми формулами

$$\begin{aligned}
u_i &= \sum_{k+l=0}^{N_u} u_i^{(kl)} x^k y^l, \quad i = 1,2,\\
\sigma_{ij} &= \sum_{k+l=0}^{N_\sigma} \sigma_{ij}^{(kl)} x^k y^l, \quad i,j = 1,2,
\end{aligned} \tag{3.2}$$

где $u_i^{(kl)}$ и $\sigma_{ij}^{(kl)}$ – неизвестные коэффициенты компонентов перемещений и напряжений соответственно, N_u и N_σ – степени полных полиномиальных приближений u_i и σ_{ij}. Считается, что степени полиномов для перемещений и напряжений связаны $N_u = N_\sigma + 1$.

Так как область, занимаемая телом, является выпуклой, то однородное уравнение на перемещения и полиномиальные ограничения на напряжения (3.2) вместе с условием равновесия (2.4) можно точно выполнить без вырождения аппроксимаций перемещений и напряжений в Ω после соответствующего выбора степеней многочленов N_u и N_σ.

С учетом (3.2), двумерные уравнения равновесия могут быть представлены покомпонентно

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial y} = 0, \quad x \in \Omega.. \tag{3.3}$$

Из уравнений (3.2) и (3.3) следует, что коэффициенты $\sigma_{ij}^{(kl)}$ должны подчиняться линейным соотношениям

$$\begin{aligned}
&(k+1)\sigma_{11}^{(k+1,l)} + (l+1)\sigma_{12}^{(k,l+1)} = 0,\\
&(k+1)\sigma_{12}^{(k+1,l)} + (l+1)\sigma_{22}^{(k,l+1)} = 0,\\
&0 \le k + l \le N_\sigma - 1.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Подобным образом удовлетворяются граничные условия .

После удовлетворения уравнений равновесия (3.4) и граничных условий, возникает следующая задача безусловной минимизации: найти вектор $\mathbf{a}^* \in R^N$, минимизирующий следующий функционал

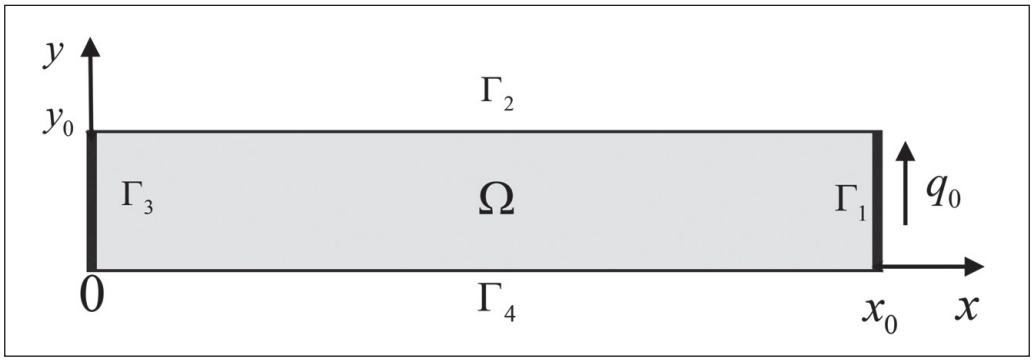


Рис. 1. Прямоугольная упругая пластина

$$\Phi(u_i^{(kl)}, \sigma_{ij}^{(kl)}) = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} - 2\Pi_{\sigma u} \to \min_{\mathbf{a}\in R^N}. \quad (3.5)$$

Вследствие того что рассматривается статическая задача, кинетические энергии не входят в (3.5). Здесь $\mathbf{a}\in R^N$ есть вектор проектных параметров, состоящий из N независимых коэффициентов $u_i^{(kl)}$ и $\sigma_{ij}^{(kl)}$, которые остаются в уравнениях (3.4) и (3.2) после решения всех уравнений равновесия и граничных условий.

После интегрирования по области Ω, задача (3.5) сводится к минимизации соответствующих квадратичной формы

$$\Phi(\mathbf{a}) = \mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\mathbf{a} - 2(\mathbf{F})^{\mathrm{T}}\mathbf{a} \to \min_{\mathbf{a}\in R^N}. \quad (3.6)$$

Здесь $\mathbf{K}\in R^{N\times N}$ является симметричной и положительно определенной матрицей и $\mathbf{F}\in R^N$ есть вектор, определяемый граничными поверхностными силами.

Вектор **a**, минимизирующий соответствующий функционалы, находится как решение линейной системы уравнений:

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{F}. \quad (3.7)$$

Следующие безразмерные геометрические и материальные параметры были выбраны: длина пластины $x_0 = 1$ и высота $y_0 = 1$, модуль Юнга $E = 100$ и коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, внешняя сила $q_0 = 1$. Расчеты были проведены с различными полиномиальными аппроксимациями степени $N_\sigma = 8,...,16$.

Упругие энергии Π_{uu}, $\Pi_{u\sigma}$ и $\Pi_{\sigma\sigma}$ приведены на рис. 2. Как можно видеть из этого рисунка, приближенное значение Π_{uu} (сплошная линия) упругой энергии монотонно убывает при увеличении порядка N_σ. В отличие от этого, значения энергий $\Pi_{u\sigma}$ и $\Pi_{\sigma\sigma}$ (пунктирные и штрихпунктирные кривые, соответственно) монотонно растут, если число N_σ увеличивается. Можно сделать вывод, что точное значение упругой энергии лежит между крайними линиями.

Данный подход позволяет явно анализировать распределение локальных ошибок. Для этой цели может быть использована плотность невязки энергии $\varphi/\Pi_{\sigma\sigma}$ из формулы (2.10). Как можно видеть на рис. 3 для рассмотренной задачи с $N_\sigma = 16$ эта функция имеет максимальные значения в тех же точках, где концентрируется плотность упругой энергии. Функция φ, указывающая на особенности решения, может использоваться для уточнения и адаптации сетки в процедурах МКЭ, чтобы улучшать качество приближенного решения.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕОРИИ ЖИДКОСТИ

Подача воды в здания под достаточным давлением является важной задачей для современной жизни. Для комфортного и безопасного снабжения требуется надежный контроль многочисленных трубопроводных систем для потребителей. Типичные трубопроводные системы состоят из нескольких широко распространенных элементов, например, длинных трубных секций, транспортирующих воду с помощью нескольких регулирующих насосов. Адекватные математические модели динамики трубопроводов, заданные в терминах уравнений в частных производных (PDE), должны

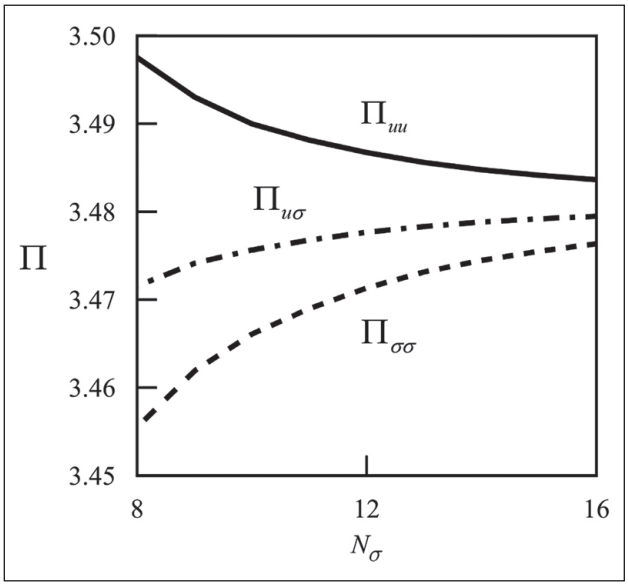


Рис. 2. Упругие энергии Π_{uu}, $\Pi_{u\sigma}$ и $\Pi_{\sigma\sigma}$ как функции числа степеней свободы N.

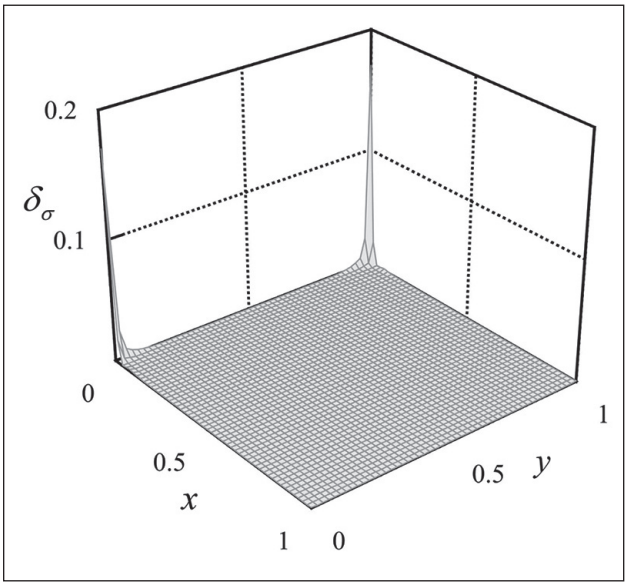


Рис. 3. Распределение энергетической ошибки φ по области Ω

учитывать распределенные характеристики системы, такие как сжимаемость среды и изменения давления жидкости и ее массового расхода [5].

Рассмотрим элемент трубопровода, состоящий из длинного прямолинейного участка трубы с транспортируемой жидкостью, подаваемой управляющим насосом. Одномерные движения сжимаемой вязкой жидкости внутри жесткой цилиндрической трубы описываются в декартовой системе координат с осью, направленной вдоль центральной линии трубопровода с началом в его левом торцевом поперечном сечении.

Предполагается, что среднее давление жидкости в любом сечении трубы $\tilde{p} = p_0 + p(t,x)$, а также массовый расход жидкости через это сечение $\tilde{q} = q_0 + q(t,x)$ не слишком отклоняются от своих номинальных значений $p_0 > 0$ и q_0. В дальнейшем все модели системы и процедуры управления выводятся в терминах избыточных давления p и массового расхода q. В модели сжимаемой жидкости давление выражается как линейная функция избыточной объемной плотности в соответствии с

$$p = \frac{\kappa}{\rho_0}\rho(t,x), \tag{4.1}$$

где $\rho_0 = \text{const}$ – номинальная плотность жидкости, $\varkappa = \text{const}$ – объемный модуль упругости.

Номинальное среднее давление в трубопроводной системе должно быть достаточно большим, чтобы гарантировать непрерывность жидкой среды в соответствии с

$$F\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \tag{4.2}$$

Здесь F – площадь поперечного сечения трубы.

Введем вспомогательную функцию эффективных перемещений $w(t,x)$, определяющую распределение избыточной объемной плотности $\rho(t,x)$ и массового расхода $q(t,x)$ через

$$\rho = -\rho_0\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{и} \quad q = F\rho_0\frac{\partial w}{\partial t}. \tag{4.3}$$

Можно показать, что условие непрерывности тождественно выполняется после подстановки определения (4.3) для объемной плотности в (4.2). Исключая функцию ρ, определяющие соотношения (4.1) и (4.3) можно представить в виде

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{p}{\kappa} = 0 \quad \text{и} \quad \eta = \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{q}{F\rho_0} = 0. \tag{4.4}$$

Уравнение равновесия для потока определяется как

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial Fp}{\partial x} + r(x,q,p) = 0, \tag{4.5}$$

где r – линейная плотность сил сопротивления жидкости в сочетании с внешними нагрузками, например, гравитацией.

Граничные условия задаются выражением

$$w(t,0) = \frac{1}{F\rho_0}\int_0^t u^0(\tau)d\tau \quad \text{и} \quad p(t,L) = u^1(t). \tag{4.6}$$

Наконец, начальные условия можно записать в виде

$$w(0,x) = -\frac{1}{\rho}\int_0^x \rho(y)dy \quad \text{и} \quad q(0,x) = q^0(x). \tag{4.7}$$

Переменные u^0 и u^1 являются либо заданными функциями времени t, либо неизвестными управляющими входами.

По аналогии с методологией, описанной в предыдущем параграфе, можно выделить два типа переменных. К измеряемым переменным отнесем функцию эффективных перемещений $w(t,x)$, а к неизмеряемым – функцию массового расхода $q(t,x)$ и давление жидкости $p(t,x)$. Все уравнения, приведенные в данном параграфе, разделяются на три группы. В первую группу входят уравнения равновесия потока жидкости (4.5) и уравнение неразрывности (4.2). Ко второй группе отнесем граничные (4.6) и начальные (4.7) условия. В третью группу включены уравнения состояния (4.4) и (4.1). Заметим, что уравнение (4.1) было использовано для исключения плотности.

Составим квадратичную форму, используя уравнения из

$$\varphi(w,p,q) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{p}{\kappa}\right)\left(\kappa\frac{\partial w}{\partial x} + p\right) +$$
$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{q}{F\rho_0}\right)\left(F\rho_0\frac{\partial w}{\partial t} - q\right) \geq 0. \tag{4.8}$$

Положительная определенность формы (4.8) непосредственно следует из положительности коэффициентов $\varkappa > 0$ и $F\rho_0 > 0$.

Интегрируя (4.8) по длине трубы и по длительности временного промежутка, получим

$$\Phi(w,p) = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} - 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0. \tag{4.9}$$

Здесь введены обозначения для потенциальных энергий

$$\Pi_{uu} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \kappa\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 dxdt,\ \Pi_{\sigma u} = -\frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T p\frac{\partial w}{\partial x}dxdt,$$

$$\Pi_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \frac{p^2}{\kappa}dxdt \tag{4.10}$$

и для кинетических энергий

$$K_{ш} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T F\rho_0\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 dxdt,\ K_{\sigma u} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T q\frac{\partial w}{\partial x}dxdt,$$

$$K_{\sigma\sigma} = \frac{1}{2}\int_0^L\int_0^T \frac{q^2}{F\rho_0}dxdt. \qquad (4.11)$$

Можно показать, что, если все соотношения (4.1)–(4.7) строго выполняются, тогда значение функционала (4.9) тождественно равно нулю

$$\Phi(w, p) \equiv 0. \qquad (4.12)$$

Этот энергетический подход всегда позволяет оценить несовершенство построенного численного решения. Как и в предыдущем параграфе, для этих целей можно построить разнообразные относительные оценки качества приближенного решения. Например, можно ограничиться, как и в предыдущем случае, оценкой (2.14).

5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ

Задача оптимального управления давлением состоит в том, чтобы найти управляющее давление в качестве входного сигнала $u^*(t)$ системы из заданного набора управлений U, которое переводит трубопроводную систему из начального состояния (4.7) в конечное равновесное состояние с желаемым распределением давления и массового расхода вдоль трубы за фиксированное время T, согласно

$$p(T,x) = p_T(x), \quad q(T,x) = 0. \qquad (5.1)$$

Здесь p_T – стационарное распределение конечного давления жидкости. При этом целевая функция $J_0[u]$, описывающая эффективную остаточную энергию всей системы, должна быть минимизирована:

$$J_0[u] \to \min_{u\in U},\quad J_0 = E(T),\quad E(T) = \int_0^1 \psi(t,x)dx,$$

$$\psi = \frac{(p-p_T)^2 + q^2}{2},\quad p_T = p_f + \kappa_0(1-x),$$

$$u(0) = 0,\quad u(T) = p_f. \qquad (5.2)$$

Все соотношения приведены к безразмерному виду подстановкой переменных в соответствии с

$$\tilde{x} = \frac{x}{l},\quad \tilde{t} = \frac{t}{\tau},\quad \tilde{w} = \frac{w}{l},\quad \tilde{q} = \frac{\tau q}{Al\rho_0},\quad \tilde{p} = \frac{p}{\kappa},$$

$$\tau = l\sqrt{\frac{\rho_0}{\kappa}},\quad \tilde{\kappa}_0 = \frac{l\kappa_0}{A\kappa},\quad \tilde{\kappa}_1 = \tau\kappa_1. \qquad (5.3)$$

В дальнейшем знаки тильда во всех уравнениях опускаются.

Для разработки оптимального закона управления рассмотрим полиномиальное входное управление как

$$u \in U = u:\quad u(t) = \left\{\frac{p_f t}{T} + \frac{t-T}{T}\sum_{k=1}^{K}\frac{u_k t^k}{T^k}\right\},$$

$$u(0) = 0,\quad u(T) = p_f. \qquad (5.4)$$

После решения начально краевой задачи, описываемой функционалом (4.9), методом, подробно обсужденном в п. 2., решение находится при неопределенных компонентах вектора $\boldsymbol{u} = \{u_1,...,u_k\}$ управляющих параметров. Полученные вектор-функции $\tilde{\mathbf{w}}(t,\mathbf{u})$ и $\tilde{\mathbf{q}}(t,\mathbf{u})$ используются для минимизации модифицированной целевой функции

$$J_1(\mathbf{u}) \to \min_{\mathbf{u}},\quad J_1 = \tilde{J}_0(\mathbf{u}) + \frac{\gamma}{T}\Phi(\mathbf{u}), \qquad (5.5)$$

где аддитивный член с безразмерным весовым коэффициентом γ влияет на числовое значение обусловленности оптимального решения. Символ «тильда» в (5.5) означает, что соответствующие функционалы выражаются через решения $\tilde{\mathbf{w}}$, $\tilde{\mathbf{q}}$ после подстановки их вместо оптимальных значений. Вектор $\mathbf{u}^*$, полученный в результате нахождения оптимальной функции управления $u^*(t) = u(t, \mathbf{u}^*)$, используется для последующих численных симуляций.

Для демонстрации эффективности алгоритма оптимизации, рассматриваются два управляемых процесса в трубопроводной системе. Первый процесс соответствует течению идеальной жидкости в однородной герметичной трубе без сопротивления ($\varkappa_0 = \varkappa_1 = 0$). Во втором процессе течение жидкости характеризуется постоянным и вязким сопротивлением с коэффициентами системы ($\varkappa_0 = \varkappa_1 = 1$). Управляющие параметры $T = 4$, $p_f = 1$, $K = 9$, $\gamma = 10$ используются для всех примеров в этом разделе.

Временная диаграмма оптимального управления давлением $u^*(t)$ представлена на рис. 4 для обоих процессов. Законы управления для идеальной и вязкой жидкости показаны на этом рисунке пунктирными и сплошными кривыми, соответственно. Видно, что оптимальное управление давлением выше, если принять во внимание сопротивление вдоль трубы. Кроме того, монотонный характер функции управления нарушается в случае вязкой жидкости.

На рис. 5 и 6 показаны распределения давления жидкости как для идеальной, так и для вязкой жидкости в пространстве и времени. Отметим, что предлагаемая стратегия управления позволяет нам переводить системы из их начальных состояний в близкую окрестность заданных конечных распределений давления $p_\tau(x)$ таким образом, что нежелательные колебания предотвращаются.

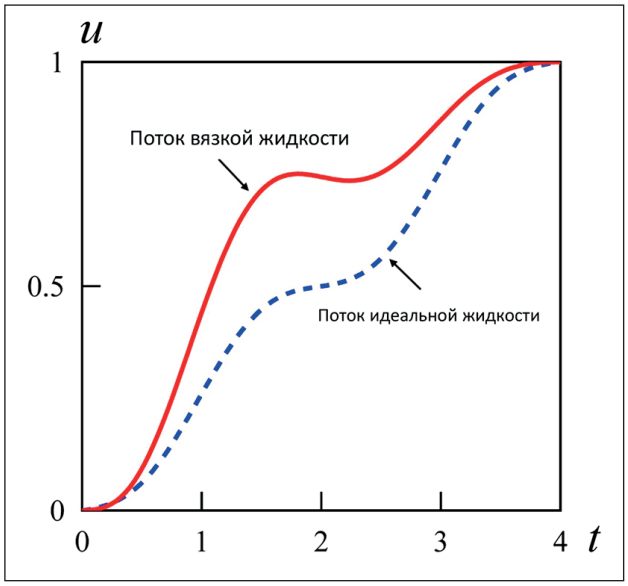


Рис. 4. Оптимальное граничное давление

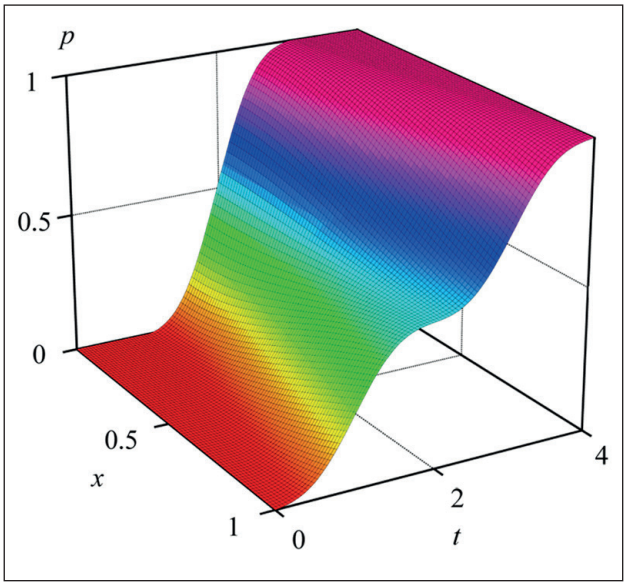


Рис. 5. Распределение давления для потока идеальной жидкости

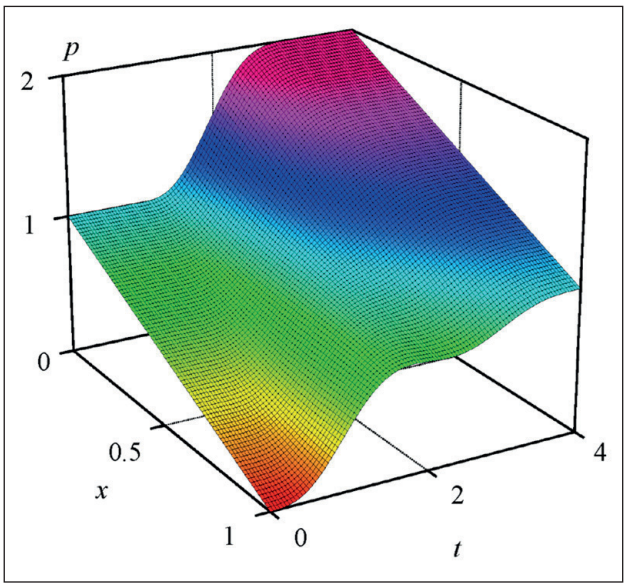


Рис. 6. Распределение давления для потока вязкой жидкости

Значение функции стоимости, определенной в (5.2), равно $J_0 = 9.6 \cdot 10^{-8}$ для идеальной жидкости. Относительная интегральная погрешность, введенная в (2.14), для этого приближения довольно мала: $\delta_\sigma = 1.6 \cdot 10^{-9}$. Для модели с вязким сопротивлением эти значения существенно меньше полученных для идеальной жидкости и равны $J_0 = 3.9 \cdot 10^{-10}$ и $\delta_\sigma = 7.1 \cdot 10^{-11}$, соответственно. Это означает, что вязкость в линейной модели жидкости может быть ценным фактором, повышающим качество приближенных решений. Более того, она способствует снижению интенсивности остаточных колебаний.

6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП В ЗАДАЧЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Рассмотрим процесс теплопередачи в двух пространственных координатах в прямоугольной пластине с размерами a и b. Закон переноса теплового потока (закон Фурье) связывает между собой вектор плотности теплового потока

$$q = [q_y(y,z,t), q_z(y,z,t)] = \\ = [\sqrt{\theta_a}\,\bar{q}_y(y,z,t), \sqrt{\theta_a}\,\bar{q}_z(y,z,t)] \qquad (6.1)$$

и градиент температуры:

$$\begin{cases} q_y + \lambda \dfrac{\partial \theta}{\partial y} = \bar{q}_y + \lambda \dfrac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0 \\ q_z + \lambda \dfrac{\partial \theta}{\partial z} = \bar{q}_z + \lambda \dfrac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad \{y, z, t\} \in \Omega \times \{0, T\},$$

$$\Omega = (-a/2, a/2) \times (-b/2, b/2). \qquad (6.2)$$

Здесь температура обозначается как $\theta(y,z,t)$ и λ является коэффициентом теплопроводности. Для того чтобы использовать методологию, описанную в предыдущих параграфах, в этих уравнениях введены новые переменные $q_y = \tilde{q}_y$, $q_z = \tilde{q}_z$, $\theta = \sqrt{\theta_a}\,\theta$. Как видно, такая замена не изменяет вид уравнений (6.2). Здесь θ_a – температура окружающей среды.

Первый закон термодинамики приводит к

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{\alpha}{h}\theta + \mu(y,z,t) = 0, \qquad (6.3)$$

где ρ – объемная плотность материала пластины, c_p – удельная теплоемкость, α – коэффициент конвективной теплопередачи, а h – толщина пластины. Функция $\mu(y,z,t)$ представляет как распределенное управление, так и внешние возмущения.

В терминах плотностей теплового потока q_y и q_z граничные условия задаются как

$$q_y(y, \pm b/2, t) = 0, \quad q_z(\pm a/2, x, t) = 0. \tag{6.4}$$

Для того чтобы завершить формулировку начально-краевой задачи, зададим начальное распределение температуры

$$\theta(y, z, 0) = \theta_0(y, z). \tag{6.5}$$

В полной аналогии со случаем линейной упругости, рассмотренным в предыдущем разделе, уравнения теплопередачи (6.2)–(6.5) можно объединить в три группы, введя новую функцию r_q таким образом, что уравнение примет вид

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + r_q(y, z, t) = 0, \tag{6.6}$$

где

$$r_q + \kappa_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} - \kappa_2 \theta - \mu = r_q + \kappa_1 r_\theta. \tag{6.7}$$

Здесь для удобства введены новые параметры: $\varkappa_1 = \rho c_p, \varkappa_2 = 2\alpha/h = h$ и $r_\theta = \partial\theta/\partial t - \varkappa_2\theta/\varkappa_\mu/\varkappa_1$. Явного указания начальных и граничных условий для r_q не требуется, поскольку они уже полностью определены уравнениями (6.4) и (6.5).

Итак, уравнение (6.6) входит в первую группу уравнений. Это аналог уравнения равновесия (2.4). Граничные (6.4) и начальные (6.5) условия относятся ко второй группе. Соотношения (6.2) и (6.7) составляют третью группу уравнений, и только эти соотношения содержат информацию о свойствах материала.

По аналогии с начально-краевой задачей (2.4)–(2.7) важно рассмотреть квадратичные значения определяющих соотношений (6.2) и (6.7). Невязку в задании потенциальной (тепловой) энергии, которая вытекает из (6.7), можно представить в виде

$$\Phi_W = W_{uu} - 2W_{u\sigma} + W_{\sigma\sigma} =$$

$$= \int_{\Omega\times T} \left(r_q + \kappa_1 r_\theta\right)\left(\frac{r_q}{\kappa_1} + r_\theta\right) d\Omega dt \geq 0 \tag{6.8}$$

Из соотношения (6.2) можно составить невязку в задании кинетической энергии (теплового потока).

$$\Phi_K = K_{uu} - 2K_{u\sigma} + K_{\sigma\sigma} =$$

$$= \int_{\Omega\times T} \left\{\left(\bar{q}_y + \lambda\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial y}\right)\left(\frac{\bar{q}_y}{\lambda} + \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial y}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(\bar{q}_z + \lambda\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z}\right)\left(\frac{\bar{q}_z}{\lambda} + \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z}\right)\right\} d\Omega dt \geq 0. \tag{6.9}$$

Таким образом, из (6.8) и (6.9) следует

$$\Phi(\theta, q) = \Phi_W + \Phi_K = \Pi_{uu} + \Pi_{\sigma\sigma} -$$

$$- 2\Pi_{\sigma u} + K_{uu} + K_{\sigma\sigma} - 2K_{\sigma u} \geq 0. \tag{6.10}$$

Тогда, если все соотношения (6.2)–(6.7) строго выполняются, значение функционала (6.10) тождественно равно нулю

$$\Phi(\theta, q) \equiv 0. \tag{6.11}$$

Как и в предыдущих случаях, данный подход позволяет оценить несовершенство построенного численного решения. Для этих целей можно построить разнообразные относительные оценки качества приближенного решения. Например, можно ограничиться, как и в предыдущем случае, оценкой (2.14).

7. ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Рассмотрим прямоугольную металлическую пластину, показанную на рис. 7. Существует набор геометрических и физических параметров системы, которые используются при моделировании. Размеры пластины представлены на этом рисунке.

Физические параметры пластины следующие:

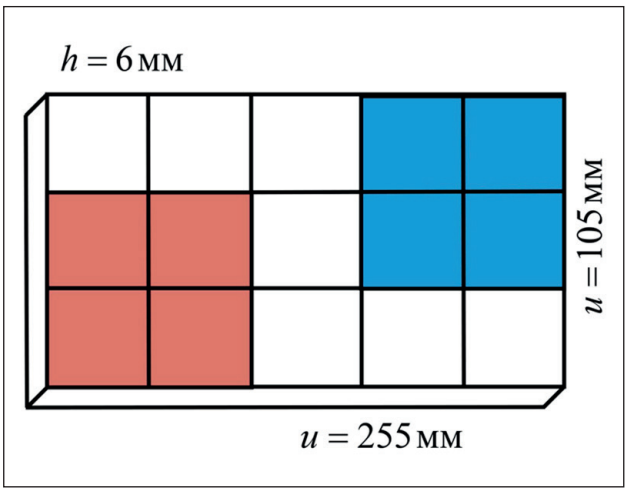


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

$$\lambda = 110\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1},\quad \rho = 2700\ \text{кг}\cdot\text{м}^{-3},$$
$$c_p = 896\ \text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1},\quad \alpha = 60\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}. \quad (7.1)$$

Параметры этой модели были определены в серии экспериментов.

В терминах плотности теплового потока граничные условия задаются выражением

$$y = \pm\frac{a}{2}: \quad q_z = 0; \quad z = \pm\frac{b}{2}: \quad q_y = 0. \quad (7.2)$$

Предполагается, что все стороны пластины адиабатически изолированы. Тепловое воздействие (управление) на пластину осуществляется с помощью элементов Пельтье в сочетании с охлаждающими устройствами (цветные области на рисунке). Отметим, что такой вид управляющего воздействия может быть учтен функцией $\mu(y,z,t)$ в уравнении (6.3). Если $\mu > 0$, то это процесс нагрева. Если $\mu < 0$ – охлаждения.

Считается, что два управляющих входа расположены на цветных частях пластины. Нижняя часть пластины соответствует месту, где пластина нагревается элементом Пельтье с интенсивностью: $\mu_1(y,z,t) = 60W/(abh)$. Верхняя часть пластины охлаждается с $\mu_2(y,z,t) = 30W/(abh)$.

Для учета разрывной функции управления $\mu(y,z,t)$ разработана конечно-элементная схема, представленная на рис. 8, на основе четырехузлового четырехугольного элемента. Межэлементные условия (непрерывность) на каждом смежном элементе имеют вид

$$\theta_1 = \theta_2, \quad q_y^1 = q_y^2, \quad q_z^1 = q_z^2. \quad (7.3)$$

Полиномиальные аппроксимации неизвестных функций температуры и теплового потока заданы для каждого элемента в следующем виде

$$\theta = \sum_{k+1}^{N} \theta^{(kl)}(t) y^k z^l,$$
$$q_y = \sum_{k+1}^{N+1} q_y^{(kl)}(t) y^k z^l,$$
$$q_z = \sum_{k+1}^{N+1} q_z^{(kl)}(t) y^k z^l. \quad (7.4)$$

Удовлетворение граничных условий (7.2) с использованием аппроксимации (7.4) дает возможность составить систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно зависящих от времени функций, определенных в уравнении (7.2). Для построения последовательной дифференциальной задачи необходимо учитывать начальные условия (6.5).

Эффективность предлагаемого подхода иллюстрируется на рис. 9, на котором показаны профили температуры. Эти зависящие от времени функции вычисляются в точках O_1 и O_2 (показаны на рис. 8)

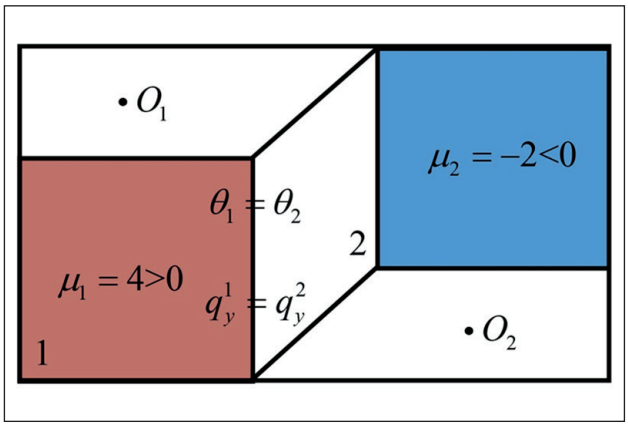


Рис. 8. Конечноэлементная сетка и межэлементные условия

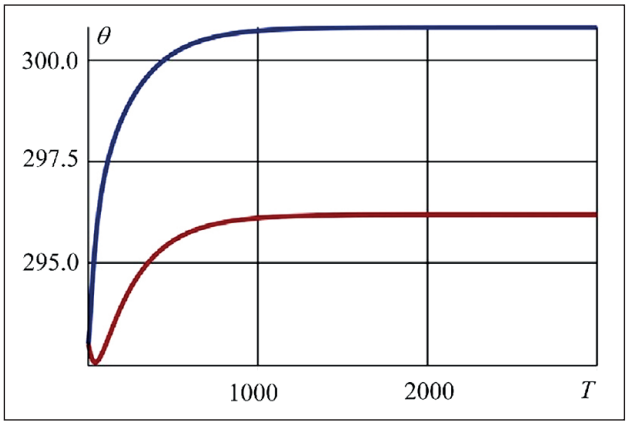


Рис. 9. Профили температуры в точках O_1 (верхняя кривая) и O_2 (нижняя кривая).

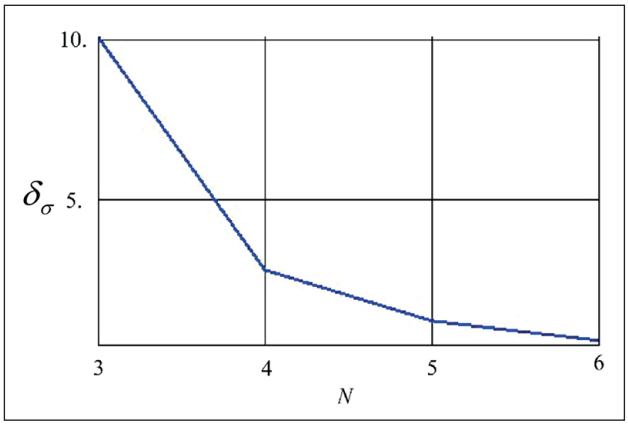


Рис. 10. Относительная погрешность δ_σ относительно степени аппроксимации N.

и представлены красными и синими линиями соответственно.

Повышение точности численных решений с ростом степени полинома приближений показано на рис. 10 в качестве примера изменения относительной погрешности δ_σ, заданной в (2.14) и выраженной в процентах.

8. ОБОБЩАЮЩИЙ ПРИНЦИП

Любая физическая система описывается измеряемыми переменными **u** и не измеряемыми **ó**, которые удовлетворяют граничные и начальные условия, а также уравнения равновесия, и связаны между собой уравнениями состояния.

Потенциальные и кинетические энергии в системе могут быть выражены через измеряемые переменные $\Pi_u(\mathbf{u})$, $T_u(\mathbf{u})$, неизмеряемые величины $\Pi_\sigma(\mathbf{u})$, $T_\sigma(\mathbf{u})$ и смешанные энергии $\Pi_{u\sigma}(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})$, $T_{u\sigma}(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma})$. Тогда истинное состояние физической системы достигается, когда строго выполняется линейное энергетическое соотношение

$$\Phi(\mathbf{u},\boldsymbol{\sigma}) = \Pi_u + \Pi_\sigma - 2\Pi_{u\sigma} + T_u + T_\sigma - 2T_{u\sigma} = 0. \quad (8.1)$$

Если значение функционала (8.1) не равно нулю, тогда относительная оценка точности приближенного решения физической задачи равна:

$$\delta_{\sigma u} = \Phi / \Pi_{\sigma u}, \quad \Phi << \Pi_{\sigma u}. \quad (8.2)$$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kostin, G.V. and Saurin, V.V., (2012). Integrodifferential relations in linear elasticity, 280 p. De Gruyter, Berlin.

2. Гусев Б.В., Саурин В.В. Подходы и принципы математического моделирования в строительной механике. *Промышленное и гражданское строительство.* 2023;11:86–90.

3. Гусев Б.В., Саурин В.В. Идеи двойственности в математическом моделировании // Перспективные задачи инженерной науки: Сборник статей XIV Международного научного форума. – ООО Инженерный центр Импульс, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Москва: 2023.

4. Aschemann, H., Kostin, G.V., Saurin, V.V. Multivariable trajectory tracking control for a heated rod based on an integro-differential approach to control-oriented modeling. In Proceedings of MMAR 2016, Poland, IEEE.Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advances in Heat Transfer. 1977;13:119–203. https://doi.org/10/1109/MMAR.2016.7575218

5. Kostin, G.V., Saurin V.V., Aschemann, H. at al. (2016). Integrodifferential approaches to frequency analysis and control design for compessible fluid flow in a pipeline element. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2014;20(5):504-527. https://doi.org/10.1080/13873954.2013.842595

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гусев Борис Владимирович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, info-rae@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2718-9539

Саурин Василий Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия, saurin@ipmnet.ru, https://orcid.org/0000-0001-9349-6890

ВКЛАД АВТОРОВ

Гусев Б.В. – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; составление заключительных выводов.

Саурин В.В. – обработка и анализ экспериментальных данных; представление результатов исследования; написание оригинального текста статьи; составление промежуточных выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.12.2024; одобрена после рецензирования 03.02.2025; принята к публикации 06.02.2025.

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73

CC BY 4.0

Creation of polymer composites with mineral fillers

Mairamkul K. Chimchikova[1], Imilya A. Rysbaeva[1], Zhanbolot K. Aidaraliev[1]*, Akmarzhan Zh. Talgatbekova[2], Anarbek B. Mamytov[1]

[1] Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan
[2] Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

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

ABSTRACT

Introduction. Currently, the development of science and technology requires the creation of new polymer composites with high technical characteristics for various industries. One of the primary methods to improve the physical and technical characteristics of polymer composites based on thermoplastic elastomers is by incorporation of natural fillers. In the Kyrgyz Republic, there is particular interest in using fine mineral fillers extracted from local natural resources. The minerals and rocks found in the region are characterized by high availability, extensive reserves, and a variety of properties. The accumulated experience in research and practical application opens up prospects for using these materials to create polymer composites with unique characteristics. This opens up new possibilities for using the cavitation process in various industrial applications, including the grinding of materials. **Methods and materials.** An experimental hydrocavitation mill has been developed to produce fine powders from minerals and rocks intended for use as fillers in polymer composites. The physicochemical properties of polymer composites and their raw materials were studied using modern instruments and equipment. The fractional composition and physical and technical characteristics of some minerals and rocks used to obtain active fillers for polymer composites are given. **Results and Discussion.** The fractional composition of crushed fillers with a particle size of less than 0.31 mm is distributed as follows: finely ground basalt – 7.3%, wollastonite – 44.6%, marble dust – 50.26%, brown coal powder – 47.56%. The analysis shows that among the studied fillers, finely ground basalt contains the smallest amount of fine fractions, which is due to its high hardness compared to other minerals such as wollastonite, marble, and coal. Physical and mechanical studies of the resulting polymer composites showed that when finely ground basalt is added, an uneven distribution of basalt powder in the polymer matrix is observed, which leads to a decrease in the strength characteristics of the composite. Therefore, to obtain a more durable material, it is necessary to grind minerals and rocks to the level of microparticles using the cavitation effect. For this purpose, a laboratory mill was created that operates based on the cavitation effect. Fillers at the level of micro- and nanoparticles were obtained using the developed hydro cavitation mill. The physical and technical characteristics of polymer composites with additives of the resulting nanofillers have been determined. The compressive strength of composites with mineral fillers (fraction less than 0.31 mm, content of wollastonite filler in the composite – 25.2%) was 5.47 MPa, with basalt filler – 5.2 MPa, and with leather powder (dust) – 4.25 MPa. Fillers at the level of micro- and nanoparticles were obtained using the developed hydro cavitation mill. The physical and technical characteristics of polymer composites with additives of the resulting nanofillers have been determined. The compressive strength of composites with mineral fillers (fraction less than 0.31 mm, content of wollastonite filler in the composite – 25.2%) was 5.47 MPa, with basalt filler – 5.2 MPa, and with leather powder (dust) – 4.25 MPa. The compressive strength of the composite with the addition of carbon filler (13.2%) was 4.2 MPa. The introduction of up to 14.2% of mineral fillers into the composition of the composite increases its heat resistance: when adding basalt filler – up to 106 °C, and wollastonite – up to 114 °C. **Conclusion.** The fractional composition of mineral fillers based on inorganic raw materials studied for their use in creating polymer composites. A hydro cavitation mill was made and a method for processing fillers from minerals and rocks was developed. New polymer composites were obtained with the addition of basalt, wollastonite, marble, and leather industry waste. Studies have been carried out on the physical and technical characteristics of these polymer composites depending on the content of fillers, such as basalt, wollastonite, marble and leather industry waste.

KEYWORDS: polymer composites, fine powders, basalt filler, micro- and nanoparticles, composite

FOR CITATION:
Chimchikova M.K., Rysbaeva I.A., Aidaraliev Z.K., Talgatbekova A.Zh., Mamytov A.B. Creation of polymer composites with mineral fillers. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):59–73. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73. – EDN: WPYWAO.

© Chimchikova M.K., Rysbaeva I.A., Aidaraliev Z.K., Talgatbekova A.Zh., Mamytov A.B., 2025

INTRODUCTION

In modern conditions, polymer composites are widely used in various industries. This is due to the available technology for processing polymers, their relatively low cost, as well as the ability to create durable and lightweight products for various purposes.

Composites based on polymers and mineral fillers are systems consisting of two or more components with different chemical compositions and structures. Reinforcing elements improve the physical and technical characteristics of the material, and matrix components form a frame that provides a connection between the reinforcing elements [1–3].

Nanocomposite materials are composite materials with nanoscale components that are used in architectural construction, surface coating, automotive industry, space industry and high technology [4–9].

Adding fillers from various natural sources is one of the effective methods for improving polymer composite materials based on thermoplastic elastomers [10–16]. In the Kyrgyz Republic, the use of fine mineral fillers extracted from local natural resources is of particular interest. The minerals and rocks available in the Kyrgyz Republic are characterized by availability, extensive reserves and a variety of properties. The experience of their processing and application, accumulated through scientific and practical means, opens up opportunities for the use of these materials in the creation of polymer composite materials for various purposes with improved properties [17–20]. The physical and technical characteristics of polymer composites can be enhanced by reinforcement using various fillers, depending on their fractional composition. Unlike other types of fillers, mineral fillers do not form a homogeneous material with the polymer. Instead, they are distributed in the polymer in the form of separate particles constituting a separate phase, which requires preliminary preparation and processing of fillers by certain requirements [1–20].

Fillers in polymers, whether in powder, fiber, or sheet form, can change the flow and viscosity of the material, affecting flow rates. Their presence can also modify the conditions of cavitation, which occurs when a certain flow velocity is reached when the pressure becomes equal to the saturated vapor pressure. This critical speed corresponds to the moment the cavitation begins. Modern technologies actively use the cavitation process for various purposes, including the creation of installations for grinding materials [21–23].

METHODS AND MATERIALS

The granulometric method has been used to determine the fractional composition of finely ground material in various ways. Fine powder of basalt, wollastonite, marble and coal from local mineral raw materials is distributed in a ball mill using a set of sieves ranging in size from 0.14 to 10 mm.

Previously, finely ground natural basalt from the Suluu-Terek deposit was used to create composites [11].

The physical and mechanical characteristics of polymer composites created based on mineral fillers were studied using an RT-250 M tensile testing machine. Thermoplastic elastomer was chosen as the polymer, while the percentage and size of filler fractions varied. Fillers included finely ground basalt stone, wollastonite, marble, coal and leather dust.

The particle sizes of finely ground minerals and rocks after the cavitation process as fillers were determined using a Quanta 200i 3D scanning electron microscope [24]. Studies were also carried out on the chemical resistance of the resulting polymer composites to water, ethyl alcohol, gasoline, acetic acid and industrial oil. Fine powdered fillers were used to create polymer composites. Table 1 contains data on such inorganic-based fillers available in the Kyrgyz Republic.

Table 1 shows various ranges of filler particle sizes, ranging from more than 10 mm to less than 0.31 mm.

Table 1. Finely ground fillers on an inorganic basis

Sample No.	Sieve diameter, mm	Fine fillers, %			
		Basalt powder (Kashka-Suu)	Wollastonite powder	Marble powder	Brown coal powder
1	More than 10 mm	36.2	0.4	0.2	0.7
2	10–5	23.1	12.7	3.4	10.2
3	5–2.5	16.5	7.6	5.8	6.3
4	2.5–1.25	8.5	14.1	15.8	16.3
5	1.25–0.31	8.6	21.2	24.6	19.5
6	Below 0.31	7.1	44	50.2	47

Particular attention should be paid to the last range, where the percentage of fine fillers is quite high. Wollastonite powder, dolomite marble powder and brown coal powder in the range of less than 0.31 mm have a high percentage of 44÷50.2%, indicating the need for processing to reduce particle sizes and ensure more uniform distribution.

Having considered the sizes of filler fractions and their insufficient performance properties, it is proposed to use the cavitation method in a liquid medium to reduce the size of filler particles. For this purpose, the use of a hydrocavitator, shown in Figure 1, is considered.

Finely ground mineral fillers in a hydro cavitation mill analyzed, taking into account the processing time carried out every 4 hours.

RESULTS AND DISCUSSION

Obtained results after study of fillers influence on physical and mechanical characteristics of the polymer composite shown in the table 2.

Analysis of the table data allows us to conclude that the type and size of filler particles have a significant influence on the characteristics of the composite. The high strength of the composite (3.5–5.2 MPa) is ensured by an increase in the content of finely ground basalt to 40.0% and wollastonite powder to 40.0% with a fraction of less than 0.31 mm, which indicates increased adhesion between the filler and the polymer matrix. Other fillers, such as marble dust, coal dust and leather dust, do not show such high physical and technical values. Thus, coal dust has the minimum strength (2.91 MPa), as well as the lowest density (1.05 g/cm³) and hardness (59.1 conventional units). Marble dust and leather dust also do not have sufficient physical and technical characteristics compared to finely ground basalt and wollastonite.

Fillers for polymer composites with a fraction below 0.31 mm have higher hardness and density, which is associated with their uniform distribution in the composite matrix.

A graph of changes in the density of polymer composites depending on the content of fillers is shown in Fig. 2. From Figure 2 it can be seen that at a low content of fillers (curves 2 and 3), the density is almost the same. However, with an increase in the percentage of basalt fibers and powder, a decrease in density is observed (curve 2). Averaged graphs show linear behavior composite.

Averaged graphs show linear behavior. However, when finely ground basalt is added in an amount of 3–4%, the density change graph becomes nonlinear (the line takes the shape of a parabola), which indicates a significant effect on the properties of the composite.

It is observed that increasing the percentage of mineral filler in the composite leads to an increase in the density of the material. For example, introducing up to 14% fillers causes an increase in density by 10% and 15% for finely

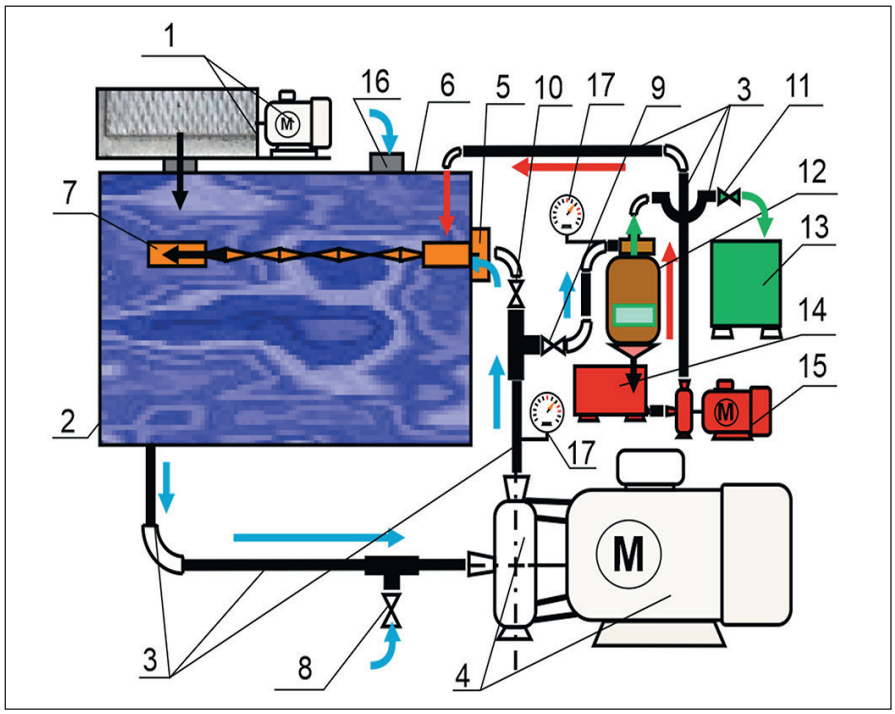


Fig. 1. Hydrocavitation mill: 1 – grinder; 2 – capacity; 3 – pipes; 4, 15 – pumps; 5 – vortex; 6 – cavitation chamber; 7 – vortex brake; 8÷11 – valves; 12 – hydraulic separator; 13 – container for processing field; 14 – tank (large filler fraction); 16 – water fills; 17 – pressure gauge for measuring pressure

Table 2. Physical and technical characteristics of polymer composites

Content and fraction of filler		$\delta_{stretching}$, MPa	$\varepsilon_{rel.}$, %	$\varepsilon_{perm.}$, %	ρ, g/cm³	Hardness, a.u.
Filler	Fraction, mm					
Thermoplastic elastomer	–	3.75	265.2	20.2	1.07	57.2
Finely ground basalt (25.0%)	0.31÷2.5	3.62	256.3	21.1	1.15	64.1
	2.5÷1.25	3.54	254.2	24.3	1.16	66.2
	1.25÷0.31	3.61	258.1	21.2	1.14	63.1
	< 0.315	4.82	289.3	18.1	1.13	62.3
Finely ground basalt (40.0%)	0.31÷2.5	3.51	251.4	23.2	1.18	67.4
	2.5÷1.25	3.36	240.5	28.1	1.25	69.1
	1.25÷0.31	3.52	252.3	23.2	1.16	66.3
	< 0.31	5.21	315.2	22.3	1.13	65.2
Finely ground wollastonite (25.0%)	0.31÷2.5	4.0	280.1	21.2	1.14	63.2
	2.5÷1.25	3.6	25.2	24.2	1.21	67.3
	1.25÷0.31	4.1	302.1	20.1	1.12	61.2
	< 0.31	5.45	341.2	17.2	1.09	60.2
Finely ground wollastonite (40.0%)	0.31÷2.5	4.2	301.3	22.2	1.31	68.3
	2.5÷1.25	3.4	250.2	25.2	1.33	70.4
	1.25÷0.31	4.6	286.3	21.1	1.28	69.4
	< 0.315	5.6	342.1	20.4	1.25	63.3
Marble dust (25.0%)	< 0.31	3.9	278.5	20.3	1.15	61.2
Carbon dust (25.0%)	< 0.31	2.91	175.3	20.5	1.05	59.1
Leather dust (25.0%)	< 0.31	4.2	282.2	24.5	1.03	60.3

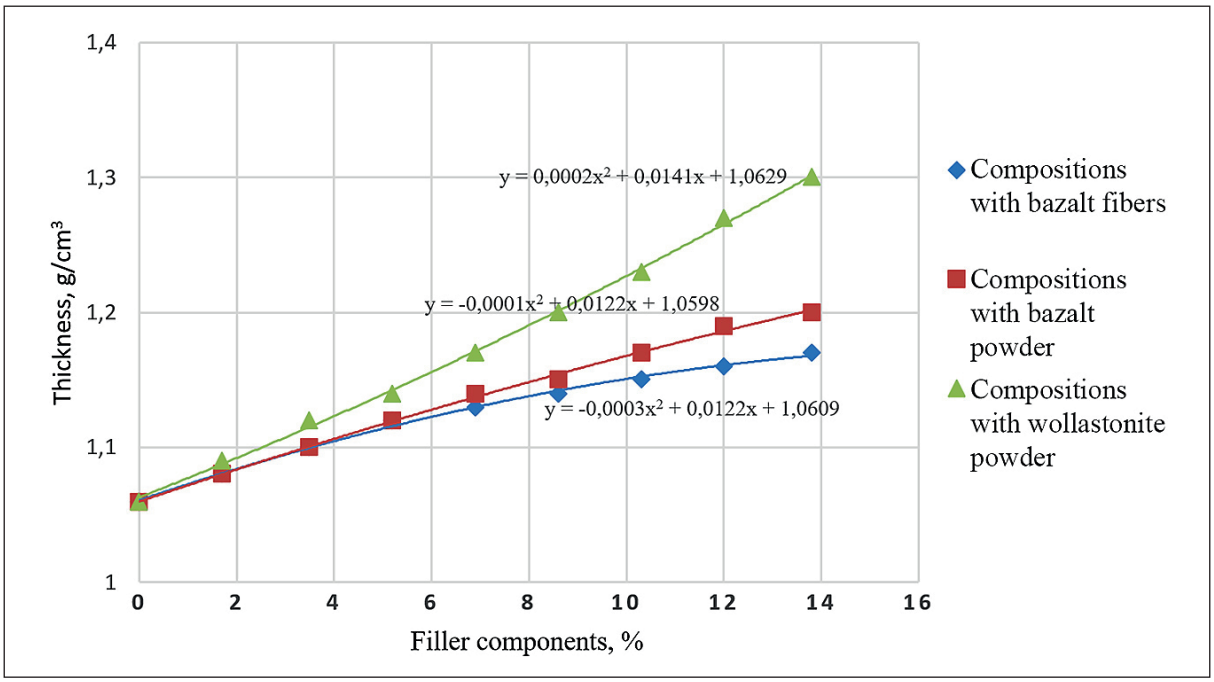


Fig. 2. Changes in the density of polymer composites depending on the percentage of mineral fillers

ground basalt and by 17% for finely ground wollastonite. Increasing the percentage of filler also increases the viscosity of the composite material, making it more difficult to process.

Table 3 presents the obtained results of the physical and technical characteristics of composites with mineral fillers.

Finely ground wollastonite has proven to be an active filler for thermoplastics, increasing the tensile strength of the composite by 22% in the content range up to 14%. This effect is explained by a mathematical relationship in the form of a third-order polynomial.

Finely ground basalt stone did not prove to be an active filler for the divinylstyrene matrix of thermoplastic elastomer. The decrease in tensile strength with increasing filler content is described by linear equations for both powder and short fibers. The decrease in the tensile strength of composites with short basalt fibers is associated with their uneven distribution in the volume of the polymer: coefficient –0.088φ for powder compared to coefficient –0.062φ for fibrous filler. The formation of large aggregates of short basalt fibers makes it difficult to distribute them evenly, which in turn leads to a greater reduction in tensile strength than would be expected based on a linear relationship.

From Table 3 and Figure 3, it can be seen that the addition of finely ground basalt to the composite led to an increase in residual stress and a decrease in elongation.

The degree of swelling of composites based on mineral fillers in technical oil and acetic acid is presented in Table 4, and the kinetics of their swelling is shown in Figures 4–8. However, further swelling of samples containing wollastonite and basalt with a fraction of 2.5–1.25 mm as fillers occurs faster than for samples with fraction sizes of less than 0.31 mm. The highest degree of swelling in technical oil is observed in samples

Table 3. Physicomechanical characteristics of composites with mineral fillers

Composite	Filler content, % (mass.)	$\delta_{stretching}$, MPa	$\varepsilon_{rel.}$, %	$\varepsilon_{perm.}$, %
Composite with finely ground basalt	4.7	3.7	266	20
	9	3.67	263	20.1
	13	3.65	260	20.4
	16.7	3.62	258	20.8
	20	3.6	256	21
	23	3.58	254	21.6
	25.9	3.53	253	22.2
	28.6	3,5	251	23
Composite with basalt fibers	4.7	3.68	265	20
	9	3.65	261	20
	13	3.63	260	21
	16.7	3.58	256	23
	20	3.53	254	24
	23	3.5	251	25
	25.9	3.43	245	27
	28.6	3.35	240	28
Composite with finely ground wollastonite	4.7	3.72	268	20
	9	3.8	270	20.1
	13	3.84	273	20.3
	16.7	3.9	277	20.7
	20	4.0	280	21
	23	4.02	287	21.2
	25.9	4.05	295	21.7
	28.6	4.1	301	22

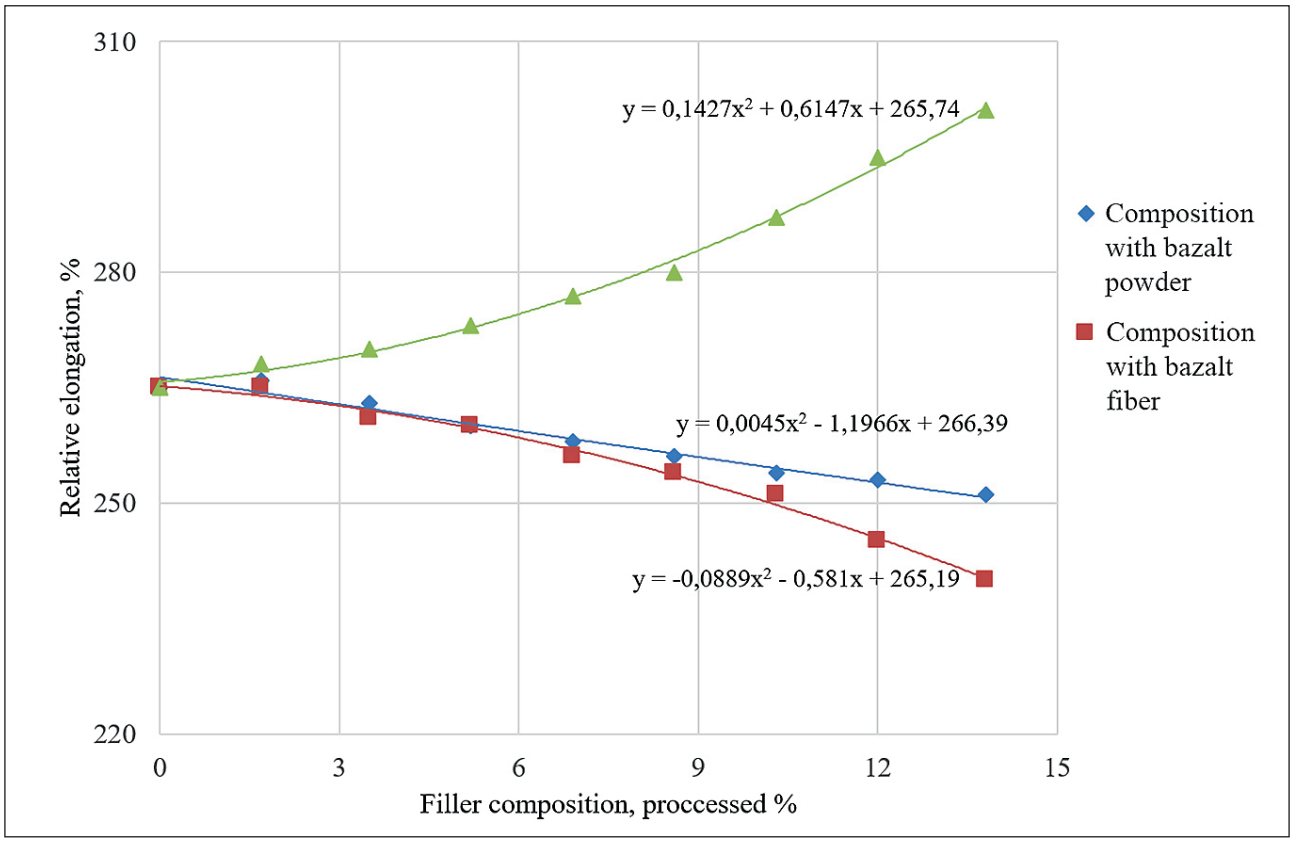


Fig. 3. Relative elongation of composites with mineral fillers at break, %

of composites containing leather dust and coal powder as fillers.

An analysis of the swelling kinetics curves of the resulting polymer composites with mineral fillers in technical oil showed that all composite samples remained stable upon contact for up to 24 hours (Fig. 4–8). However, further swelling of samples containing wollastonite and basalt with a fraction of 2.5–1.25 mm as fillers occurs faster than for samples with fraction sizes of less than 0.31 mm.

The highest degree of swelling in technical oil is observed in samples of composites containing leather dust and coal powder as fillers.

Results of the analysis of Fig. 4–8 indicate that all composite compositions were resistant to acetic acid. A composite with finely ground wollastonite as a filler showed a particularly high degree of resistance to acetic acid, while composites with carbon powder turned out to be less stable.

When exposed to gasoline, the resulting polymer composites demonstrated relative stability after short contact (2–4 hours). The most stable were composites with finely ground wollastonite with fraction sizes of 2.5–1.25 mm. However, with prolonged contact (4–8 hours), the composites became sticky, lost their shape and began to swell.

After immersing the composites in water for 48 hours, no changes in their size and weight were observed.

Next, the fractional composition of finely ground materials obtained in a laboratory hydrocavitator mill was analyzed (Fig. 1).

Electron microscopy of the surfaces of mineral fillers was obtained using a Quanta 200i 3D scanning electron microscope, the image is shown in Fig. 9.

After further grinding of finely ground basalt using a hydrocavitation mill, its particle sizes sharply decreased from the micron range to the nanorange (Fig. 9). Particle sizes range from 77 to 751 nm. During grinding using a hydrocavitation mill, an increase in the content of fine fractions is observed due to the destruction of large fractions of minerals. Figure 10 shows the dynamics of changes in powder sizes.

After completion of hydrocavitation grinding, the composition of the fractions becomes heterogeneous. Large fractions predominate: 500÷700 and above 700 nm. Small fractions: 50÷100 and from 100÷300 nm make up 30.0% of the volume (Fig. 10).

The results of energy dispersive spectroscopy of finely ground basalt after the cavitation grinding process are presented in Fig. 11a and b.

Comparing the spectra of finely ground basalt before and after the grinding process in a hydrocavitation mill,

Table 4. Swelling capacity of polymer composites at different contents and fractions of fillers, %

Content and fraction of filler		Swelling, %							
Filler content, %	Fractions, mm	In technical oil					In acetic acid		
		8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	2 h	8 h	24 h
Without filler	0.00	6.4	12.6	22	28.4	28.3	2.6	5.2	8. 0
Finely ground basalt at 25.0 %	Components of fraction	4.2	10.3	19.6	24.6	25.4	1.7	4.3	7.7
	2.5–1.25	3.3	9.2	19.7	24.8	27	3.7	7.2	7.7
	1.25–0.31	5.0	9.5	19.4	24.1	26.3	2.2	4.0	6.9
	Less than 0.31	6.2	9.7	17.4	23	24.2	2	3.3	6.4
Finely ground basalt at 40.0%	Components of fraction	4.3	8.0	16.0	21.0	24.4	2.0	3.2	6.2
	2.5–1.25	2.8	8.4	16.7	22.4	25.1	2.0	3.5	6.4
	1.25–0.31	3.6	8.1	16.4	22.1	24.7	1.7	3.3	6.0
	Less than 0.31	5.2	7.7	15.6	20.4	23.0	1.5	3.0	5.7
Finely ground wollastonite at 25.0%	Components of fraction	5.3	9.6	16.5	21.0	26,8	0.8	3.3	5.7
	2.5–1.25	7.2	14.3	25.1	32.2	32.3	1.0	3.3	9.7
	1.25–0.31	5.8	11.2	23.5	26.8	27.0	0.7	3.2	4.6
	Less than 0.31	3.5	8.8	17.0	22.5	23.4	0.7	3.0	3.1
Finely ground wollastonite at 40.0%	Components of fraction	2.7	9.2	15.3	20.5	21.0	0.2	3.2	3.3
	2.5–1.25	2.7	7.9	15.8	21.0	22.1	0.1	3.1	3.5
	1.25–0.31	2.8	8.3	15.5	21.1	22.0	0.1	3.0	3.1
	Less than 0.31	3.3	7.7	14.4	20.0	20.1	0.2	2.8	2.9
Carbon dust at 25.0%	Components of fraction	13.8	19.0	31.1	41.5	41.6	6.7	10.1	20.1
Marble dust at 25.0%	Less than 0.31	4.6	9.1	21.3	27.4	28.0	3.4	6.7	16.7
Leather dust at 25.0%	Components of fraction	7.5	18.6	26.0	29.7	37.1	3.5	6.9	17.3

we observe an increase in the oxygen and carbon content by 1.5–2 times. This fact indicates that cavitation is not only a physical, but also a physicochemical process.

The cavitation process occurs at different temperatures and with strong hydraulic shock of the finely ground powder under study. The combination of these two factors leads not only to the mechanical process of grinding, but also to the occurrence of physical and chemical processes of processing the surface of powdered materials. Table 5 shows the physical and mechanical characteristics of polymer composites with basalt powder after the cavitation process.

As can be seen from Table 5 and Figure 12, the tensile strength of the composite containing finely ground basalt

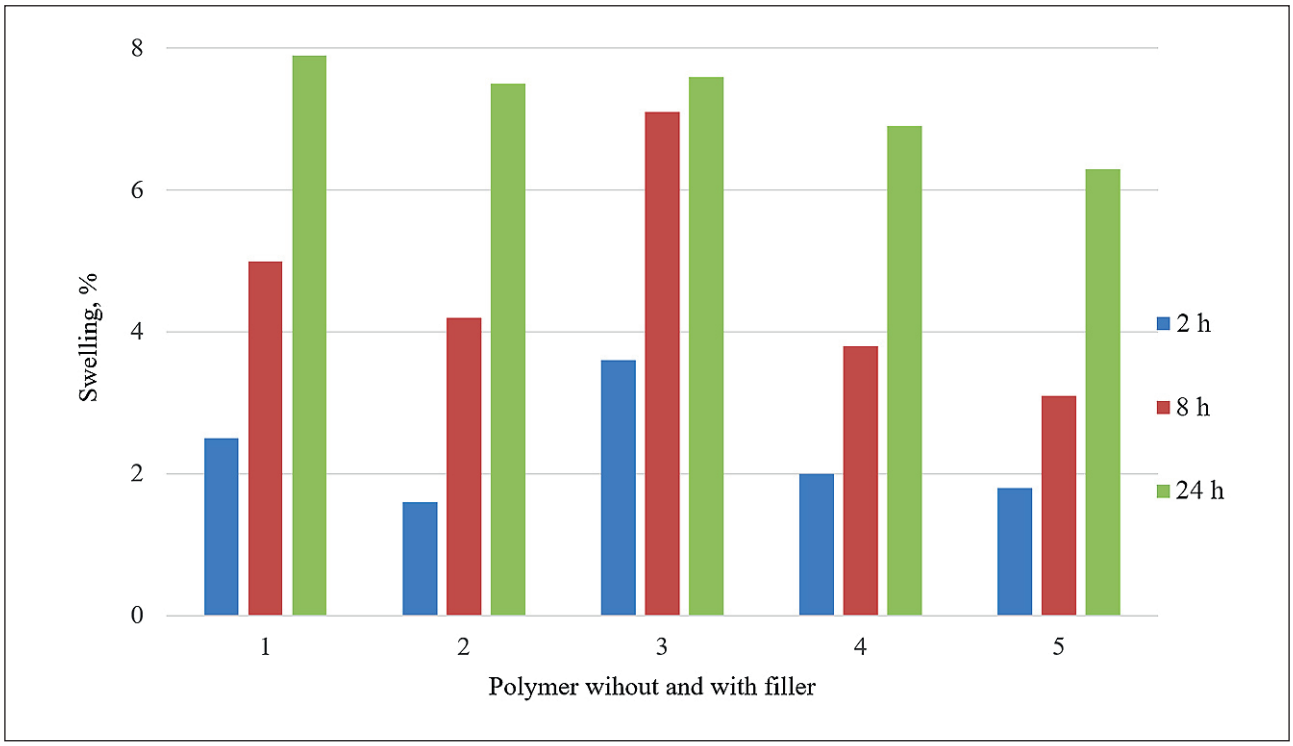


Fig. 4. Swelling diagram of polymer composite without filler and with filler (finely ground basalt of various fractions – 25%) in acetic acid, %: 1 – without filler; 2 – fraction composition; 3 – fraction at 2.5–1.25 mm; 4 – fractions at 1.25–0.31 mm; 5 – filler fraction less than 0.31 mm

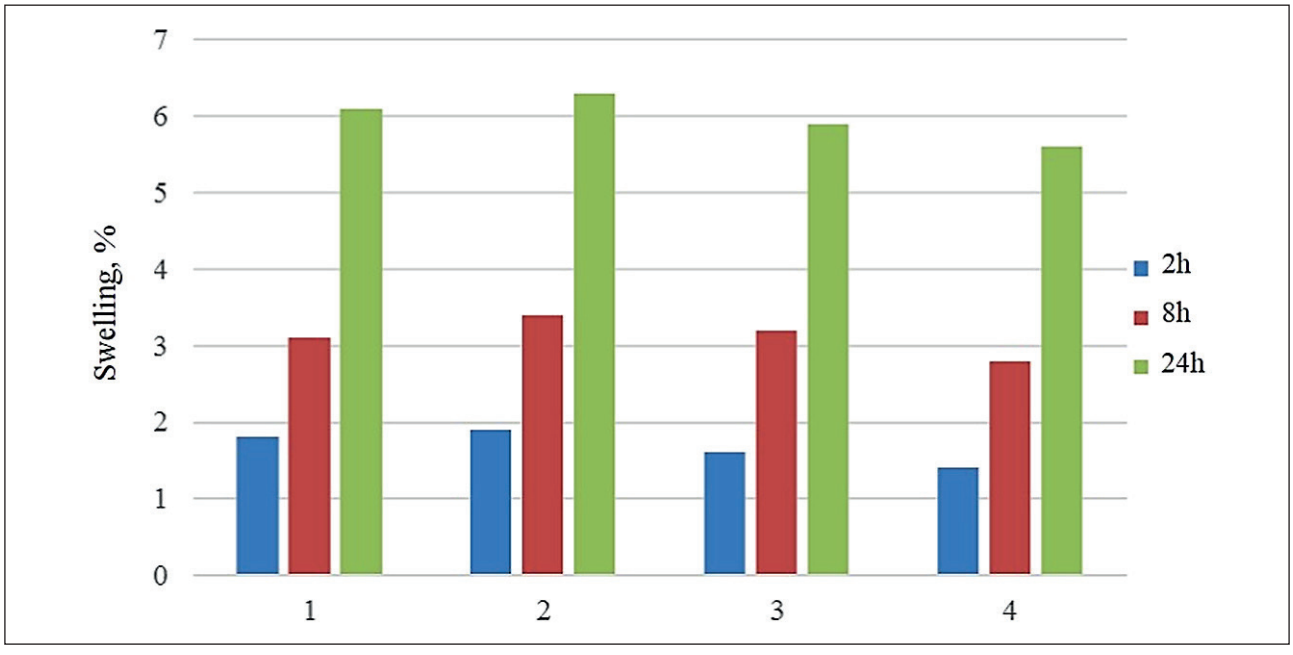


Fig. 5. Diagram of swelling of a polymer composite from finely ground basalt (40%) with different fractions in acetic acid, %: 1 – composition of fractions; 2 – filler fraction size 2.5–1.25 mm; 3 – filler fraction size 1.25–0.31 mm; 4 – filler fraction size at less than 0.31 mm

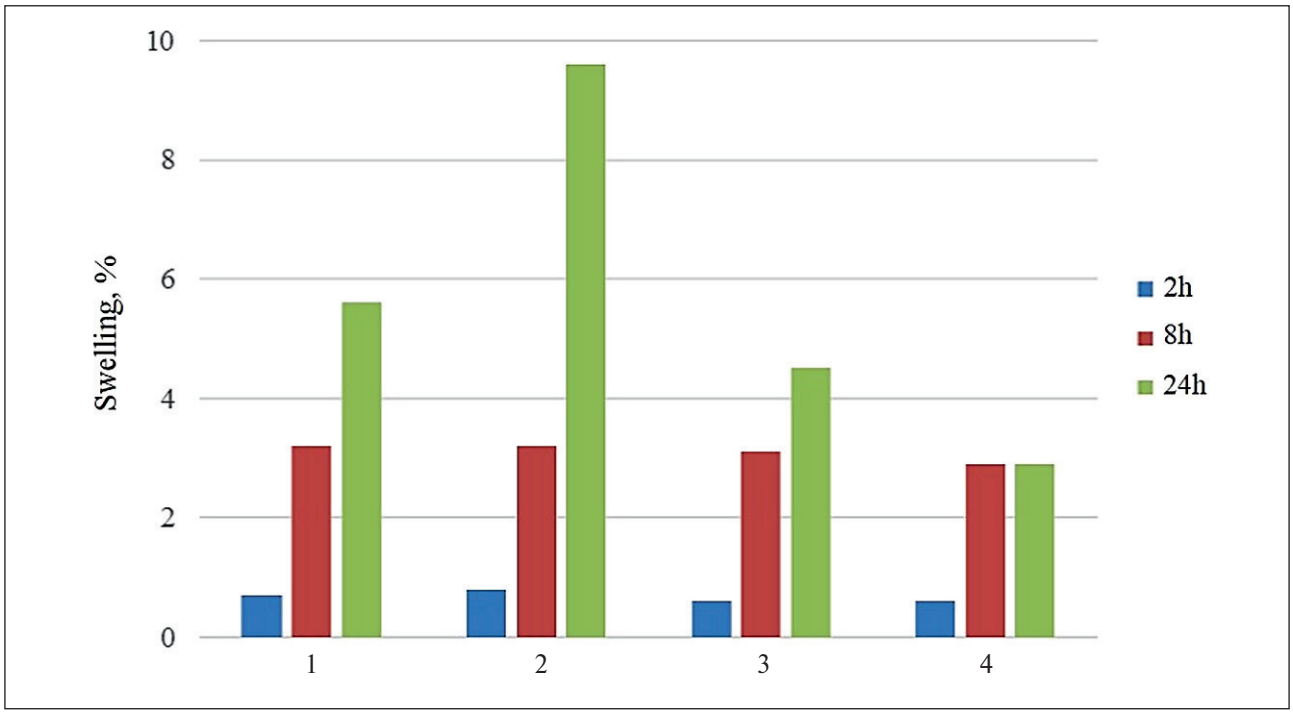


Fig. 6. Diagram of swelling of a polymer composite with finely ground wollastonite (25.0%) with different fractions in acetic acid, %: 1 – composition of fractions; 2 – filler fraction at 2.5–1.25 mm; 3 – filler fraction at 1.25–0.31 mm; 4 – filler fraction at less than 0.31 mm

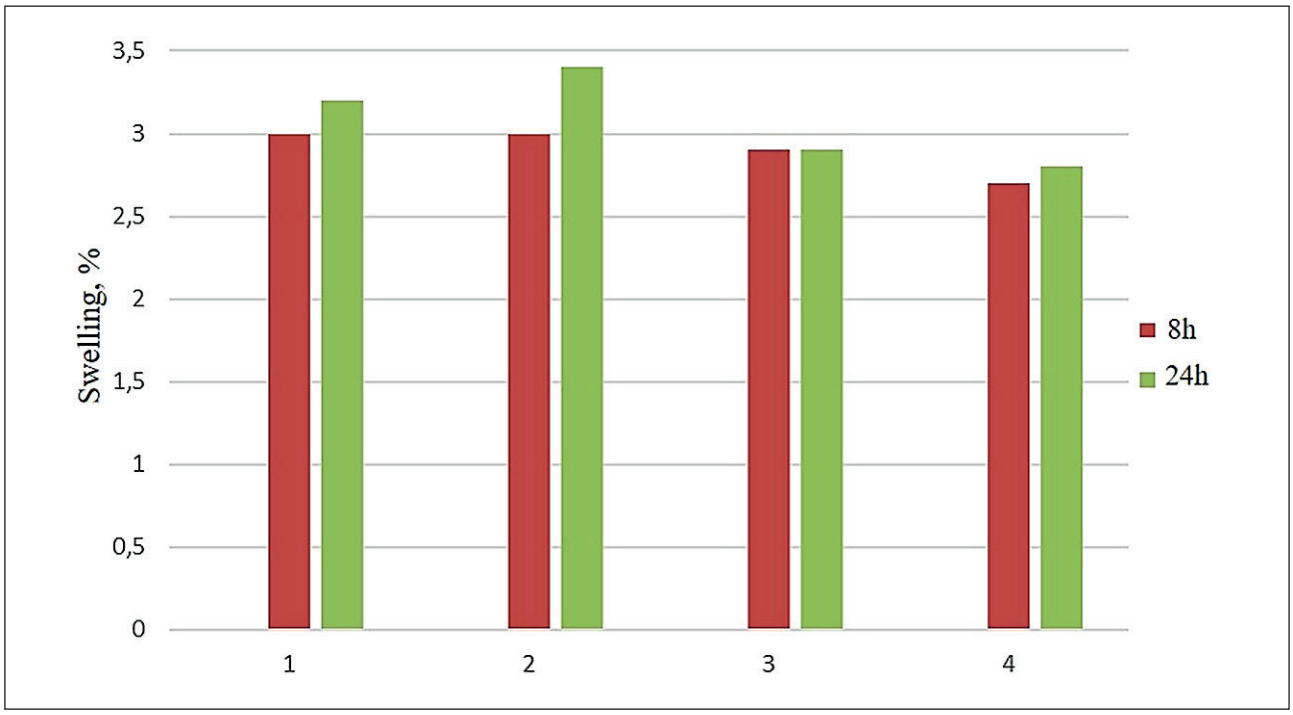


Fig. 7. Diagram of swelling of a polymer composite with finely ground wollastonite (40.0%) of various fraction sizes in acetic acid, %: 1 – mixture of fractions; 2 – filler fraction size 2.5–1.25 mm; 3 – filler fraction size 1.25–0.31 mm; 4 – filler fraction size less than 0.31

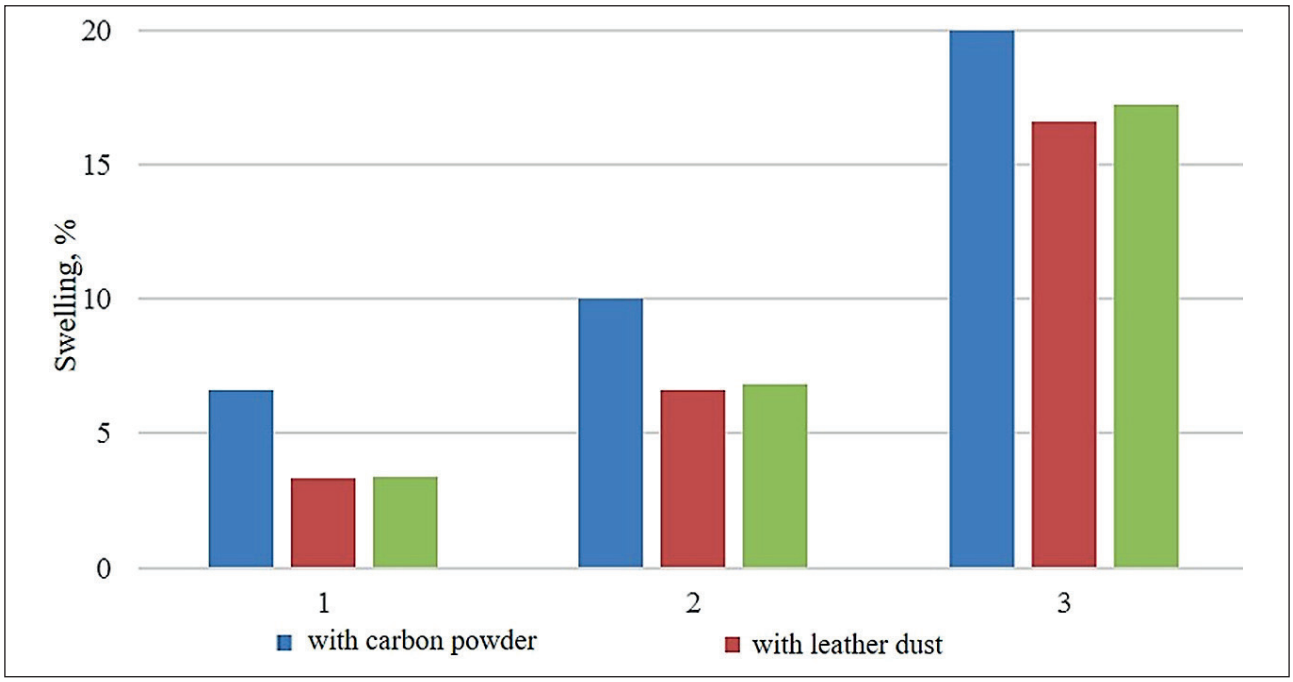


Fig. 8. Diagram of swelling in acetic acid of a polymer composite with the addition of various fillers (25.0%), %:
1 – after 2 hours; 2 – after 8 hours; 3 – after 24 hours

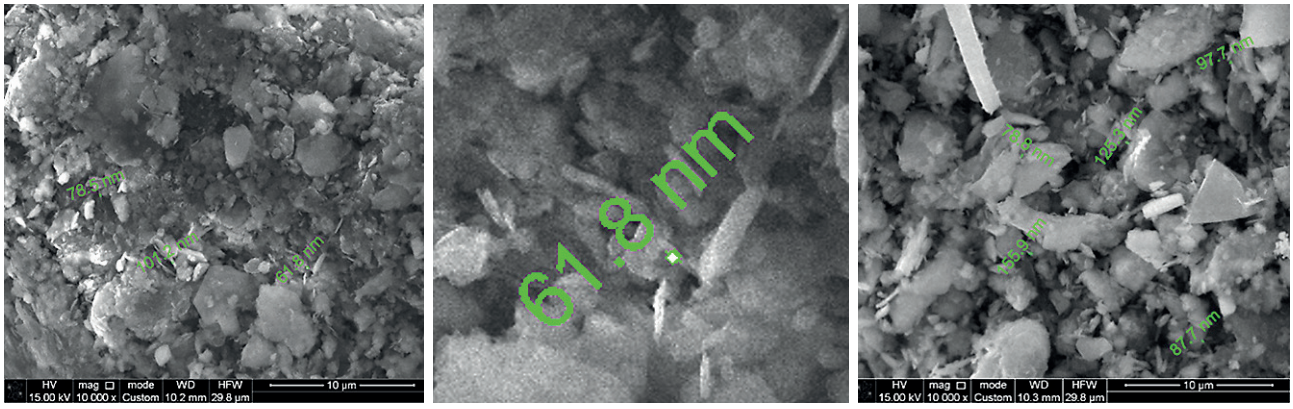


Fig. 9. Electron microscopy of mineral filler surfaces

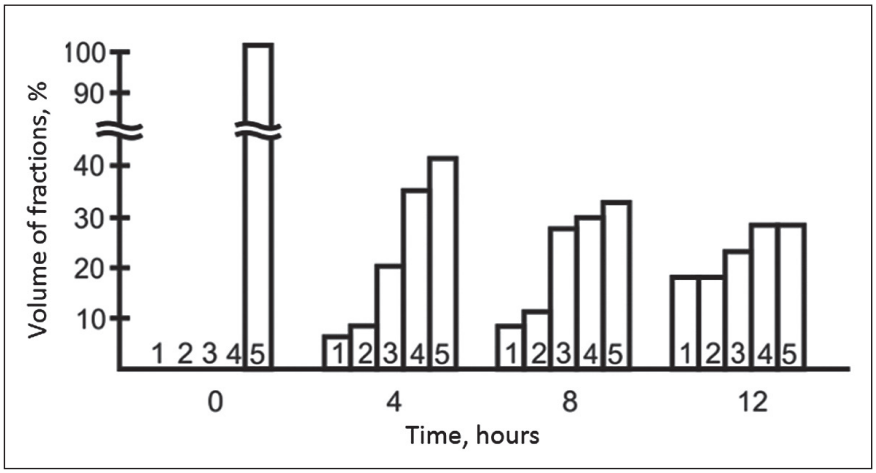


Fig. 10. Finely ground basalt stone after cavitation:
1 – fraction from 50 to 100 nm;
2 – fraction 100÷300 nm;
3 – fraction 300÷500 nm;
4 – fraction 500÷700 nm;
5 – fraction above 700 nm

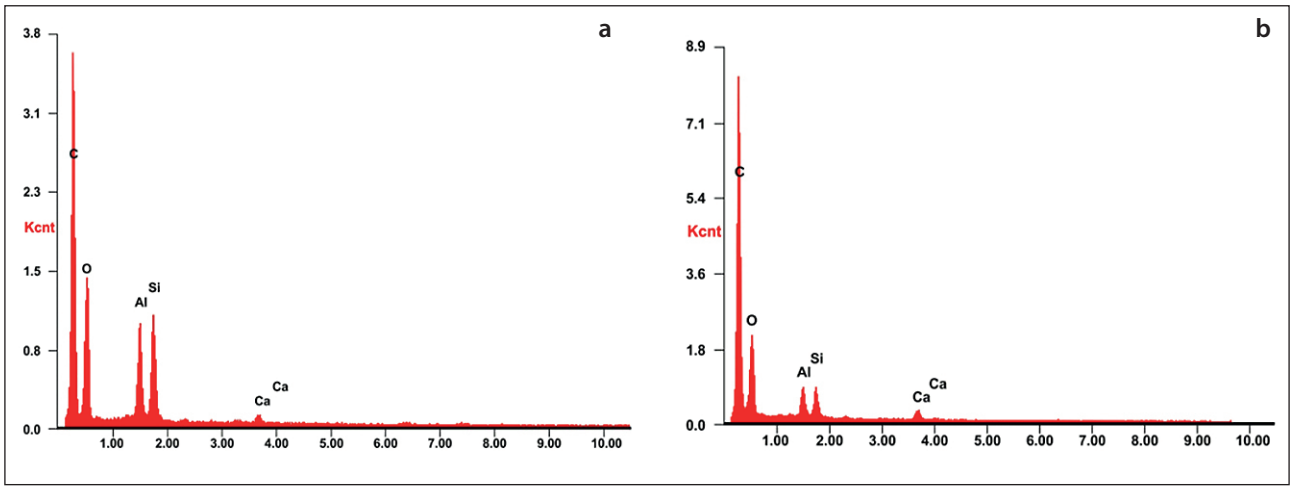


Fig. 11. Comparative EDS spectra of finely ground basalt: a – after mechanical grinding; b – after cavitation grinding

Table 5. Physico-mechanical characteristics of polymer composites with finely ground basalt after a cavitation mill

Content of finely ground basalt, in %	$\delta_{stretching}$, MPa	$\varepsilon_{rel.}$, %	$\varepsilon_{perm.}$, %
4.9	3.9	271	19.7
9.5	3.95	276.8	19.6
13. 4	4.6	282.5	19.3
16.9	4.7	287.6	20.8
20.6	4.9	289.7	20.9
23.5	4.97	295.6	21.4
26	5.4	303.5	22.4
28.7	5.3	315.4	22.5

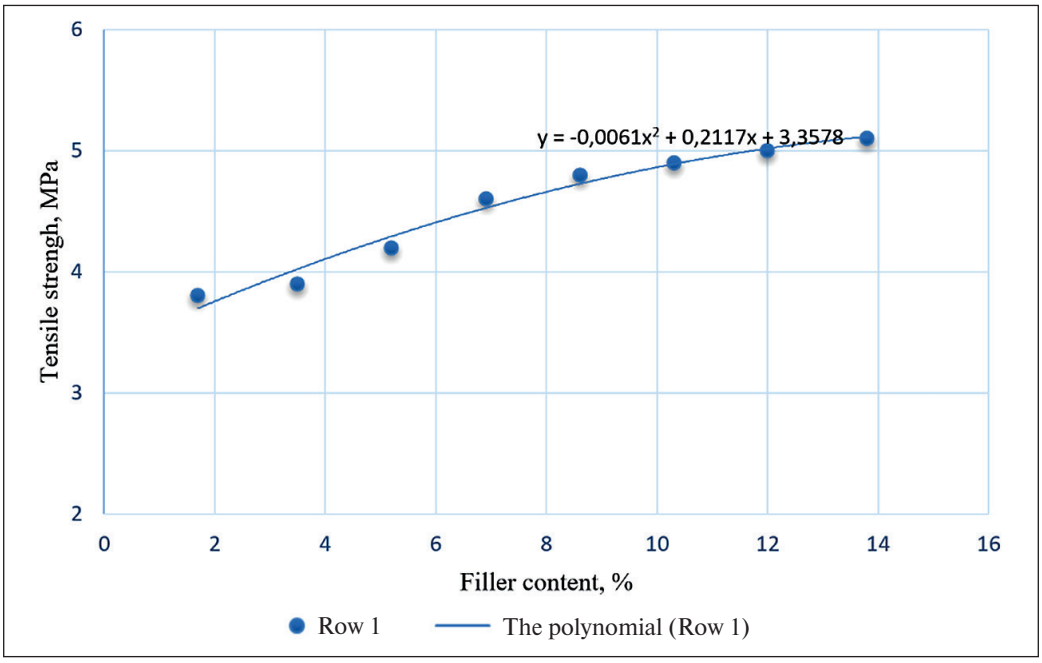


Fig. 12. Tensile strength of the composite after cavitation mill

Table 6. Physical and technical characteristics of polymer composites with inorganic fillers

No.	Characteristics	Polymer comosite with inorganic fillers		
		Basalt	Wollastonite	Carbon
1	Thickness, g/cm^3	1.14	1.12	0.98
2	Shore hardness, arb. units	63-65	59-62	60-63
3	Tensile strength, MPa	4.9	5.50	4.1
4	Elongation at break, %	290	342	246
5	Residual elongation, %	19	18	22
6	Heat resistance, °C	79	87	76

increased after cavitation treatment. Table 6 shows the physical and technical characteristics of the resulting polymer composite with mineral fillers.

As can be seen from the Table 6 physical and technical characteristics of the resulting polymer composites using inorganic fillers meet the requirements of the Government Standard.

CONCLUSION

According to the obtained research results, the following conclusions were made:

1. Finely ground fillers on an inorganic basis were studied: basalt and wollastonite stone, marble and coal dust. The research results showed that the use of inorganic fillers from minerals and rocks of the Kyrgyz Republic in the composition of polymer composites improves their physical and technical characteristics, and also allows for reducing the cost of the polymer composite material.

2. A hydro cavitation mill has been created for processing finely ground inorganic fillers intended for the production of organic polymer composites with inorganic additives. Using this mill, fillers with particle sizes of 50–100 nm – 15%, 100–300 nm – 15%, 300–500 nm – 20%, 500–700 nm – 25% and more than 700 nm – 25% were obtained.

3. It has been established that the use of finely ground and processed filler powders after cavitation treatment makes it possible to increase the tensile strength to 5.1 MPa, and the heat resistance of polymer composites based on thermoplastic elastomers to 100–110 °C. In addition, it improves water resistance and resistance to aggressive media such as industrial oil, acetic acid and gasoline.

4. The physical and mechanical characteristics of composites with inorganic fillers have been studied. It was revealed that the developed polymer composites with inorganic fillers (basalt, wollastonite, marble, coal dust) have a set of physical and mechanical characteristics that meet the requirements of the standards.

REFERENCES

1. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.G. Polymer Composite Materials. *Dolgoprudny. Intellect.* 2010; 352.

2. Kolosova A.S. Modern Polymer Composite Materials and Their Application. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018; 5(1): 245-256.

3. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S. Fillers for the Modification of Modern Polymer Composite Materials. Fundamental Research. 2017; 10(3): 459-465.4. Rogov V.A., Shkarupa M.I., Velis A.K. Classification of composite materials and their role in modern mechanical engineering. *Bulletin of RUDN University, series Engineering Research*. 2012; 2:41-49. (In Russ.)

4. Li XuHui., Zhao Yi. Nanocomposite Building Materials in Modern Architectural Design. *Journal of Nanomaterials*. 2022;1169911,8. https://doi.org/10.1155/2022/1169911

5. Rathod V.T., Kumar J.S., Jain A. Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace applications. *Appl Nanosci*. 2017;**7**:519–548. https://doi.org/10.1007/s13204-017-0592-9

6. Lukuttsova N., Pykin A., Kleymenicheva Y., Suglobov A., Efremochkin R. Nano-additives for composite building materials and their environmental safety. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(11):7561–7565.

7. Rashid A.B., Haque M., Islam S.M.M., Uddin Labib K.M.R. Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications. *Heliyon*. 2024;10(2):e24692. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

8. Abdullaeva Z. *Nanomaterials for Building and Protection*. In: Nanomaterials in Daily Life. Publishing: Springer, Cham. 2017; 91-110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57216-1_5

9. Rogov V.A., Shkarupa M.I., Velis A.K. Classification of Composite Materials and Their Role in Modern Mechanical Engineering. *Bulletin of RUDN, Series: Engineering Research*. 2012; 2: 41-49.

10. Ershova O.V., Ivanovsky S.K., Chuprova L.V., Bakhaeva A.N. Modern Composite Materials Based on a Polymeric Matrix. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015; 4: 14-18.

11. Melnichenko M.A., Ershova O.V., Chuprova L.V. Effect of Filler Composition on the Properties of Polymer Composite Materials. *Young Scientist*. 2015; 16(96): 199-202.

12. Zavyalova N.B., Stroganov V.F., Stroganov I.V., Akhmetshin A.S. Study of the Influence of Filler Nature on the Strength Properties of Heterophase Polymer Compositions. *Bulletin of KazGASU*. 2007; 1(7): 63-66.

13. Lipatov Yu.S. *Physicochemistry of Filled Polymers*. Kyiv: Naukova Dumka Publishing, 1967.

14. Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., Nisa F.U. Fillers and methods to improve the effective (out-plane) thermal conductivity of polymeric thermal interface materials – A review. *Heliyon*. 2024;10(3):e25381. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25381

15. Lasrado D., Ahankari S., Kar K. Nanocellulose-based polymer composites for energy applications – a review. *J Appl Polym Sci*. 2020;137:48959. https://doi.org/10.1002/app.48959

16. Kwon Y.J., Park J.B., Jeon Y.P., Hong J.Y., Park H.S., Lee J.U. A Review of Polymer Composites Based on Carbon Fillers for Thermal Management Applications: Design, Preparation, and Properties. *Polymers (Basel)*. 2021;13(8):1312. https://doi:org/10.3390/polym13081312

17. Akunova M., Imankulova A.S., Chimchikova M.K. Study of Various Types of Fillers for Their Application in Polymer-Based Composite Materials. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates, and Students "Youth – The Driving Force of Science*," I. Razzakov KSTU, Part 2. Bishkek. 2017; 116-120.

18. Abdykalykov A.A., Aydaraliev Zh.K., Kainazarov A.T., Abdiev M.S. Determination of the Fractional Composition of Basalt Production Waste for Obtaining a Composite Composition. *Bulletin of KSUSTA. Bishkek*. 2019; 1(63): 137-144.

19. Aidaraliev Z., Rysbaeva I., Atyrova R., Abdykalykov A., Bekbolot kyzy B., Zholdoshova C., Sopubekov N., Kuduev A., Dubinin I., Abdullaeva Z. Suitability of Suluu-Terek Basalt Deposits for Stone Casting. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2022;10:1-14. https://doi:org/10.4236/jmmce.2022.101001

20. Abdykalykov A., Aydaraliev Zh.K., Abdykalyk kyzy Zh., Kuduev A.Zh., Rashid kyzy B. Suitability of Basalt Raw Materials from the Kyrgyz Republic for the Production of Superfine and Continuous Fibers. *Nanotechnology in Construction*. 2023; 15(6): 574–582. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582

21. Aydaraliev Zh.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. *Nanotechnology in Construction*. 2023; 15(6): 592–601. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601

22. Makavetskas A.R., Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Filippov V.I., Lebedev N.M. Influence of Cavitation on the Technological Properties of Ore and Non-Ore Mineral Raw Materials. *Nonferrous Metals*. 2007; 3: 87–92.

23. Ershov V.A., Kondratyev V.V., Afanasyev A.D. Sonochemical Dispersion of Quartz Using Cavitation Effects. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2011; 11(58): 159-164.

24. Chimchikova M.K. *Development of Composite Materials Based on Thermoplastic Elastomers and Mineral Filler*s. PhD Dissertation in Technical Sciences. Kyrgyzstan, Osh State University. 2023; 148.

25. Chimchikova M.K., Karpukhin A.A. Effect of Mineral Fillers on the Heat Resistance of Polymeric Composite Materials. *Bulletin of Science and Practice*. 2022; 8(8): 403-408. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/40

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mairamkul K.Chimchikova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of light industry technology, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, mchimchikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0096-8930

Imilya A. Rysbaeva – Cand. Sci. (Eng.), Professor Assistant, Department of light industry technology, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, imiyla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4481-2732

Zhanbolot K. Aidaraliev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, janlem@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1100-3237

Akmarzhan Zh. Talgatbekova – Cand. Sci. (Chem.), Professor Assistant, Head of the Department of technology and design of products and goods, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, akma.leo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4041-4545

Anarbek B. Mamytov – Lecturer at the Department of Automation of Technological Processes, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, anarbek_m@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-8201-5622

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Mairamkul K. Chimchikova – realization of the experimental part.

Imilya A. Rysbaeva – concept of the study; scientific editing of the text; final conclusions.

Zhanbolot K. Aidaraliev – scientific management; research concept.

Akmarzhan Zh. Talgatbekova – collection of material from literary sources.

Anarbek B. Mamytov – writing the text and processing the obtained data.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 08.01.2025; approved after reviewing 07.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.

Научная статья / Original article
УДК 677+678
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73

CC BY 4.0

Создание полимерных композитов с минеральными наполнителями

Майрамкуль Камчибековна Чимчикова[1], **Имийла Акимжановна Рысбаева**[1], **Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев**[1]*, **Акмаржан Женисбековна Талгатбекова**[2], **Анарбек Бейшебаевич Мамытов**[1]

[1] Кыргызский государственный технический унвиерситет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика
[2] Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время развитие науки и техники требует создания новых полимерных композитов с высокими техническими характеристиками для различных отраслей промышленности. Одним из основных способов повышения физико-технических характеристик полимерных композитов на основе термоэластопластов является использование природных наполнителей. В Кыргызской Республике особый интерес вызывает использование мелкодисперсных минеральных наполнителей, извлекаемых из местных природных ресурсов. Минералы и горные породы этого региона характеризуются высокой доступностью, обширными запасами и разнообразием свойств. Накопленный опыт исследований и практического

применения открывает перспективы использования этих материалов для создания полимерных композитов с уникальными характеристиками. Это открывает новые возможности для использования кавитационного процесса в различных промышленных установках, включая измельчение материалов. **Методы и материалы.** Разработана экспериментальная гидрокавитационная мельница для получения тонкоизмельченных порошков из минералов и горных пород, предназначенных для использования в качестве наполнителей в полимерных композитах. Физико-химические свойства полимерных композитов и их сырьевого состава исследовались с применением современных приборов и оборудования. Приведены фракционный состав и физико-технические характеристики некоторых минералов и горных пород, используемых для получения активных наполнителей для полимерных композитов. **Результаты.** Фракционный состав измельченных наполнителей с размером частиц менее 0,31 мм распределен следующим образом: тонкоизмельченный базальт – 7,3%, волластонит – 44,6%, мраморная пыль – 50,26%, порошок из бурого угля – 47,56%. Анализ показывает, что среди исследуемых наполнителей тонкоизмельченный базальт содержит наименьшее количество мелких фракций, что обусловлено его высокой твердостью по сравнению с другими минералами, такими как волластонит, мрамор и уголь. Проведение физико-механических исследований полученных полимерных композитов показало, что при добавлении тонкоизмельченного базальта наблюдается неравномерное распределение базальтового порошка в полимерной матрице, что приводит к снижению прочностных характеристик композита. Поэтому для получения более прочного материала требуется измельчение минералов и горных пород до уровня микрочастиц с использованием кавитационного эффекта. С этой целью создана лабораторная мельница, работающая на основе кавитационного эффекта. На разработанной гидрокавитационной мельнице были получены наполнители на уровне микро- и наночастиц. Определены физико-технические характеристики полимерных композитов с добавками полученных нанонаполнителей. Прочность на сжатие композитов с минеральными наполнителями (фракция менее 0,31 мм, содержание волластонитового наполнителя в композите – 25,2%) составила 5,47 МПа, с базальтовым наполнителем – 5,2 МПа, а с кожевенным порошком (пылью) – 4,25 МПа. Прочность на сжатие композита с добавлением угольного наполнителя (13,2%) составила 4,2 МПа. Введение до 14,2% минеральных наполнителей в состав композита повышает его теплостойкость: при добавлении базальтового наполнителя – до 106 °С, а волластонитового – до 114 °С. **Заключение.** Исследован фракционный состав минеральных наполнителей на основе неорганического сырья для использования их в создании полимерных композитов. Создана гидрокавитационная мельница, и разработан метод переработки наполнителей из минералов и горных пород. Были получены новые полимерные композиты с добавками базальта, волластонита, мрамора и отходов кожевенной промышленности. Проведены исследования физико-технических характеристик этих полимерных композитов в зависимости от содержания наполнителей, таких как базальт, волластонит, мрамор и отходы кожевенной промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерные композиты, мелкодисперсные порошки, базальтовый наполнитель, микро- и наночастицы, композит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Чимчикова М.К., Рысбаева И.А., Айдаралиев Ж.К., Талгатбекова А.Ж., Мамытов А.Б. Создание полимерных композитов с минеральными наполнителями. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):59–73. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73. – EDN: WPYWAO.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья / Original article
УДК 677+678
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73

CC BY 4.0

Создание полимерных композитов с минеральными наполнителями

Майрамкуль Камчибековна Чимчикова[1], **Имийла Акимжановна Рысбаева**[1], **Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев**[1]*, **Акмаржан Женисбековна Талгатбекова**[2], **Анарбек Бейшебаевич Мамытов**[1]

[1] Кыргызский государственный технический унвиерситет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика
[2] Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время развитие науки и техники требует создания новых полимерных композитов с высокими техническими характеристиками для различных отраслей промышленности. Одним из основных способов повышения физико-технических характеристик полимерных композитов на основе термоэластопластов является использование природных наполнителей. В Кыргызской Республике особый интерес вызывает использование мелкодисперсных минеральных наполнителей, извлекаемых из местных природных ресурсов. Минералы и горные породы этого региона характеризуются высокой доступностью, обширными запасами и разнообразием свойств. Накопленный опыт исследований и практического применения открывает перспективы использования этих материалов для создания полимерных композитов с уникальными характеристиками. Это открывает новые возможности для использования кавитационного процесса в различных промышленных установках, включая измельчение материалов. **Методы и материалы.** Разработана экспериментальная гидрокавитационная мельница для получения тонкоизмельченных порошков из минералов и горных пород, предназначенных для использования в качестве наполнителей в полимерных композитах. Физико-химические свойства полимерных композитов и их сырьевого состава исследовались с применением современных приборов и оборудования. Приведены фракционный состав и физико-технические характеристики некоторых минералов и горных пород, используемых для получения активных наполнителей для полимерных композитов. **Результаты.** Фракционный состав измельченных наполнителей с размером частиц менее 0,31 мм распределен следующим образом: тонкоизмельченный базальт – 7,3%, волластонит – 44,6%, мраморная пыль – 50,26%, порошок из бурого угля – 47,56%. Анализ показывает, что среди исследуемых наполнителей тонкоизмельченный базальт содержит наименьшее количество мелких фракций, что обусловлено его высокой твердостью по сравнению с другими минералами, такими как волластонит, мрамор и уголь. Проведение физико-механических исследований полученных полимерных композитов показало, что при добавлении тонкоизмельченного базальта наблюдается неравномерное распределение базальтового порошка в полимерной матрице, что приводит к снижению прочностных характеристик композита. Поэтому для получения более прочного материала требуется измельчение минералов и горных пород до уровня микрочастиц с использованием кавитационного эффекта. С этой целью создана лабораторная мельница, работающая на основе кавитационного эффекта. На разработанной гидрокавитационной мельнице были получены наполнители на уровне микро- и наночастиц. Определены физико-технические характеристики полимерных композитов с добавками полученных нанонаполнителей. Прочность на сжатие композитов с минеральными наполнителями (фракция менее 0,31 мм, содержание волластонитового наполнителя в композите – 25,2%) составила 5,47 МПа, с базальтовым наполнителем – 5,2 МПа, а с кожевенным порошком (пылью) – 4,25 МПа. Прочность на сжатие композита с добавлением угольного наполнителя (13,2%) составила 4,2 МПа. Введение до 14,2% минеральных наполнителей в состав композита повышает его теплостойкость: при добавлении базальтового наполнителя – до 106 °С, а волластонитового – до 114 °С. **Заключение.** Исследован фракционный состав минеральных наполнителей на основе неорганического сырья для использования их в создании полимерных композитов. Создана гидрокавитационная мельница, и разработан метод переработки наполнителей из минералов и горных пород. Были получены новые полимерные композиты с добавками базальта, волластонита, мрамора и отходов кожевенной промышленности. Проведены исследования физико-технических характеристик этих полимерных композитов в зависимости от содержания наполнителей, таких как базальт, волластонит, мрамор и отходы кожевенной промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерные композиты, мелкодисперсные порошки, базальтовый наполнитель, микро- и наночастицы, композит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Чимчикова М.К., Рысбаева И.А., Айдаралиев Ж.К., Талгатбекова А.Ж., Мамытов А.Б. Создание полимерных композитов с минеральными наполнителями. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):59–73. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73. – EDN: WPYWAO.

© Чимчикова М.К., Рысбаева И.А., Айдаралиев Ж.К., Талгатбекова А.Ж., Мамытов А.Б., 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Creation of polymer composites with mineral fillers

Mairamkul K. Chimchikova[1], Imilya A. Rysbaeva[1], Zhanbolot K. Aidaraliev[1]*, Akmarzhan Zh. Talgatbekova[2], Anarbek B. Mamytov[1]

[1] Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan
[2] Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

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

ABSTRACT

Introduction. Currently, the development of science and technology requires the creation of new polymer composites with high technical characteristics for various industries. One of the primary methods to improve the physical and technical characteristics of polymer composites based on thermoplastic elastomers is by incorporation of natural fillers. In the Kyrgyz Republic, there is particular interest in using fine mineral fillers extracted from local natural resources. The minerals and rocks found in the region are characterized by high availability, extensive reserves, and a variety of properties. The accumulated experience in research and practical application opens up prospects for using these materials to create polymer composites with unique characteristics. This opens up new possibilities for using the cavitation process in various industrial applications, including the grinding of materials. **Methods and materials.** An experimental hydrocavitation mill has been developed to produce fine powders from minerals and rocks intended for use as fillers in polymer composites. The physicochemical properties of polymer composites and their raw materials were studied using modern instruments and equipment. The fractional composition and physical and technical characteristics of some minerals and rocks used to obtain active fillers for polymer composites are given. **Results and Discussion.** The fractional composition of crushed fillers with a particle size of less than 0.31 mm is distributed as follows: finely ground basalt – 7.3%, wollastonite – 44.6%, marble dust – 50.26%, brown coal powder – 47.56%. The analysis shows that among the studied fillers, finely ground basalt contains the smallest amount of fine fractions, which is due to its high hardness compared to other minerals such as wollastonite, marble, and coal. Physical and mechanical studies of the resulting polymer composites showed that when finely ground basalt is added, an uneven distribution of basalt powder in the polymer matrix is observed, which leads to a decrease in the strength characteristics of the composite. Therefore, to obtain a more durable material, it is necessary to grind minerals and rocks to the level of microparticles using the cavitation effect. For this purpose, a laboratory mill was created that operates based on the cavitation effect. Fillers at the level of micro- and nanoparticles were obtained using the developed hydro cavitation mill. The physical and technical characteristics of polymer composites with additives of the resulting nanofillers have been determined. The compressive strength of composites with mineral fillers (fraction less than 0.31 mm, content of wollastonite filler in the composite – 25.2%) was 5.47 MPa, with basalt filler – 5.2 MPa, and with leather powder (dust) – 4.25 MPa. Fillers at the level of micro- and nanoparticles were obtained using the developed hydro cavitation mill. The physical and technical characteristics of polymer composites with additives of the resulting nanofillers have been determined. The compressive strength of composites with mineral fillers (fraction less than 0.31 mm, content of wollastonite filler in the composite – 25.2%) was 5.47 MPa, with basalt filler – 5.2 MPa, and with leather powder (dust) – 4.25 MPa. The compressive strength of the composite with the addition of carbon filler (13.2%) was 4.2 MPa. The introduction of up to 14.2% of mineral fillers into the composition of the composite increases its heat resistance: when adding basalt filler – up to 106 °C, and wollastonite – up to 114 °C. **Conclusion.** The fractional composition of mineral fillers based on inorganic raw materials studied for their use in creating polymer composites. A hydro cavitation mill was made and a method for processing fillers from minerals and rocks was developed. New polymer composites were obtained with the addition of basalt, wollastonite, marble, and leather industry waste. Studies have been carried out on the physical and technical characteristics of these polymer composites depending on the content of fillers, such as basalt, wollastonite, marble and leather industry waste.

KEYWORDS: polymer composites, fine powders, basalt filler, micro- and nanoparticles, composite

FOR CITATION:
Chimchikova M.K., Rysbaeva I.A., Aidaraliev Z.K., Talgatbekova A.Zh., Mamytov A.B. Creation of polymer composites with mineral fillers. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):59–73. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-59-73. – EDN: WPYWAO.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях полимерные композиты находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Это связано с доступной технологией переработки полимеров, их относительно низкой стоимостью, а также способностью создавать прочные и легкие изделия для различных целей.

Композиты на основе полимеров и минеральных наполнителей представляют собой системы, состоящие из двух или более компонентов с различным химическим составом и структурой. Армирующие элементы улучшают физико-технические харак-

теристики материала, а матричные компоненты формируют каркас, обеспечивающий связь между армирующими элементами [1–3].

Нанокомпозитные материалы представляют собой композитные материалы с наномасштабными компонентами, которые применяются в архитектурном строительстве, покрытии поверхностей, автомобилестроении, космической отрасли и высоких технологиях [4–9].

Добавление наполнителей из различных природных источников является одним из эффективных методов усовершенствования полимерных композиционных материалов на основе термоэластопластов [10–16]. В Кыргызской Республике особый интерес представляет использование мелкодисперсных минеральных наполнителей, добываемых из местных природных ресурсов. Имеющиеся в Кыргызской Республике минералы и горные породы характеризуются доступностью, обширными запасами и разнообразием свойств. Опыт их обработки и применения, накопленный научно-практическим путем, открывает возможности для использования этих материалов в создании полимерных композиционных материалов различного назначения с улучшенными свойствами [17–20].

Физико-технические характеристики полимерных композитов могут быть усилены армированием с использованием различных наполнителей, в зависимости от их фракционного состава. В отличие от других типов наполнителей, минеральные наполнители не образуют с полимером однородного материала. Вместо этого они распределяются в полимере в виде отдельных частиц, составляющих отдельную фазу, что требует предварительной подготовки и переработки наполнителей в соответствии с определенными требованиями [1–20].

Наполнители в полимерах, будучи в виде порошка, волокон или листов, могут изменить текучесть и вязкость материала, влияя на скорость потока. Их присутствие может также модифицировать условия кавитации, возникающей при достижении определенной скорости потока, когда давление становится равным давлению насыщенных паров. Эта критическая скорость соответствует моменту начала кавитации. Современные технологии активно используют кавитационный процесс для различных целей, включая создание установок для измельчения материалов [21–23].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Гранулометрический метод был использован для определения фракционного состава тонкоизмельченного материала различными способами. Тонкоизмельченный порошок базальта, волластонита, мрамора и угля из местного минерального сырья на шаровой мельнице распределен с помощью комплекта сит размером от 0,14 до 10 мм.

Ранее для создания композитов был использован тонкоизмельченный природный базальт из Сулуу-Терекского месторождения [11].

На разрывной машине РТ-250 М были исследованы физико-механические характеристики полимерных композитов, созданных на основе минеральных наполнителей. В качестве полимера был выбран термоэластопласт, при этом процентное содержание и размеры фракций наполнителей варьировались. Наполнители включали тонкоизмельченный базальтовый камень, волластонит, мрамор, угольную и кожевенную пыль.

Размеры частиц тонкоизмельченных минералов и горных пород после процесса кавитации в качестве наполнителей были определены с помощью электронного растрового микроскопа Quanta 200i 3D. Также были проведены исследования химической стойкости полученных полимерных композитов к воде, этиловому спирту, бензину, уксусной кислоте и техническому маслу [24].

Для создания полимерных композитов использовались тонкоизмельченные порошкообразные наполнители. Таблица 1 содержит данные о таких

Таблица 1. Тонкоизмельченные наполнители на неорганической основе

№ п/п	Диаметр сита, мм	Тонкоизмельченные наполнители, %			
		Базальтовый порошок (Кашка-Суу)	Волластонитовый порошок	Мраморный порошок	Порошок бурого угля
1	Более 10 мм	36,2	0,4	0,2	0,7
2	10–5	23,1	12,7	3,4	10,2
3	5–2,5	16,5	7,6	5,8	6,3
4	2,5–1,25	8,5	14,1	15,8	16,3
5	1,25–0,31	8,6	21,2	24,6	19,5
6	Ниже 0,31	7,1	44	50,2	47

наполнителях на неорганической основе, представленных в Кыргызской Республике.

В табл. 1 представлены различные диапазоны размеров частиц наполнителей, начиная от более чем 10 мм и заканчивая менее чем 0,31 мм. Особое внимание следует обратить на последний диапазон, где процентное содержание тонкоизмельченных наполнителей достаточно высоко. Волластонитовый порошок, доломитовый мраморный порошок и порошок бурого угля в диапазоне менее 0,31 мм имеют высокий процент содержания 44÷50,2%, что указывает на необходимость переработки для уменьшения размеров частиц и обеспечения более равномерного распределения.

Рассмотрев размеры фракций наполнителей и их недостаточные эксплуатационные свойства, предложено использовать кавитационный метод в жидкой среде для уменьшения размеров частиц наполнителей. Для этого рассматривается применение гидрокавитатора, представленного на рис. 1.

Исследованы тонкоизмельченные минеральные наполнители в гидрокавитационной мельнице с учетом времени обработки, проводимой каждые 4 часа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований наполнителей на влияние физико-механических характеристик полимерного композита приведены в табл. 2.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о значительном влиянии типа и размера частиц наполнителей на характеристики композита. Высокую прочность композита (3,5–5,2 МПа) обеспечивает увеличение содержания тонкоизмельченного базальта до содержания 40,0% и волластонитового порошка до 40,0% с фракцией менее 0,31 мм, что свидетельствует о повышении адгезии между наполнителем и матрицей полимера. Остальные наполнители, такие как мраморная пыль, угольная пыль и кожевенная пыль, не показывают таких высоких физико-технических значений. Так, угольная пыль имеет минимальную прочность (2,91 МПа), а также самые низкие плотности (1,05 г/см^3) и твердости (59,1 усл.ед.). Мраморная пыль и кожевенная пыль также не имеет достаточных значений физико-технических характеристик по сравнению с тонкоизмельченным базальтом и волластонитом.

Наполнители для полимерного композита с фракцией ниже 0,31 мм обладают более высокой твердостью и плотностью, что связано с их равномерным распределением в матрице композита.

График изменения плотности полимерных композитов в зависимости от содержания наполнителей представлен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при низком содержании наполнителей (кривые 2 и 3) плотность практически совпадает. Однако с увеличением процентного содержания базальтовых волокон и порошка наблюда-

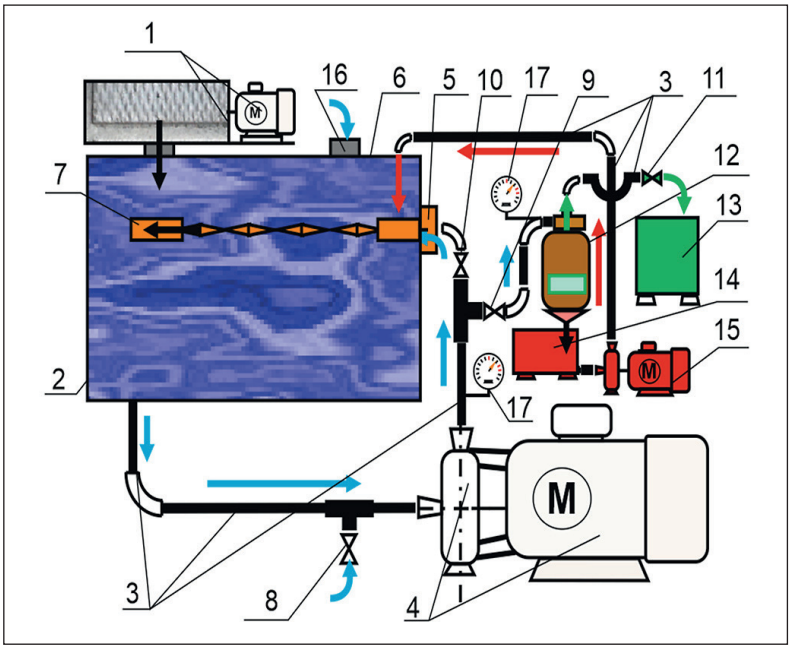


Рис. 1. Гидрокавитаторнная мельница: 1 – измельчитель; 2 – емкость; 3 – трубы; 4, 15 – насосы; 5 – вихритель; 6 – кавитационная камера; 7 – вихретормоз; 8÷11 – вентили; 12 – гидросепаратор; 13 – емкость для поля обработки ; 14 – бак (большая фракция наполнителя); 16 – заливки для воды; 17 – манометр для измерения давлений

Таблица 2. Физико-технические характеристики полимерных композитов

Содержание и фракция наполнителя		$\sigma_{раст.}$, МПа	$\varepsilon_{отн.}$, %	$\varepsilon_{ост.}$, %	ρ, г/см³	Твердость, усл.ед.
Наполнитель	Фракция, мм					
Термоэластопласт	–	3,75	265,2	20,2	1,07	57,2
Тонкоизмельченный базальт (25,0%)	0,31÷2,5	3,62	256,3	21,1	1,15	64,1
	2,5÷1,25	3,54	254,2	24,3	1,16	66,2
	1,25÷0,31	3,61	258,1	21,2	1,14	63,1
	< 0,315	4,82	289, 3	18,1	1,13	62,3
Тонкоизмельченный базальт (40, 0%)	0,31÷2,5	3,51	251,4	23,2	1,18	67,4
	2,5÷1,25	3,36	240,5	28,1	1,25	69,1
	1,25÷0,31	3,52	252,3	23,2	1,16	66,3
	< 0,31	5,21	315,2	22,3	1,13	65,2
Тонкоизмельченный волластонит (25,0%)	0,31÷2,5	4,0	280,1	21,2	1,14	63,2
	2,5÷1,25	3,6	259,2	24,2	1,21	67,3
	1,25÷0,31	4,1	302,1	20,1	1,12	61,2
	< 0,31	5,45	341,2	17,2	1,09	60,2
Тонкоизмельченный волластонит (40,0%)	0,31÷2,5	4,2	301,3	22,2	1,31	68,3
	2,5÷1,25	3,4	250,2	25,2	1,33	70,4
	1,25÷0,31	4,6	286,3	21,1	1,28	69,4
	< 0,315	5,6	342,1	20,4	1,25	63,3
Мраморная пыль (25,0%)	< 0,31	3,9	278,5	20,3	1,15	61,2
Угольная пыль (25,0%)	< 0,31	2,91	175,3	20,5	1,05	59,1
Кожевенная пыль (25,0%)	< 0,31	4,2	282,2	24,5	1,03	60,3

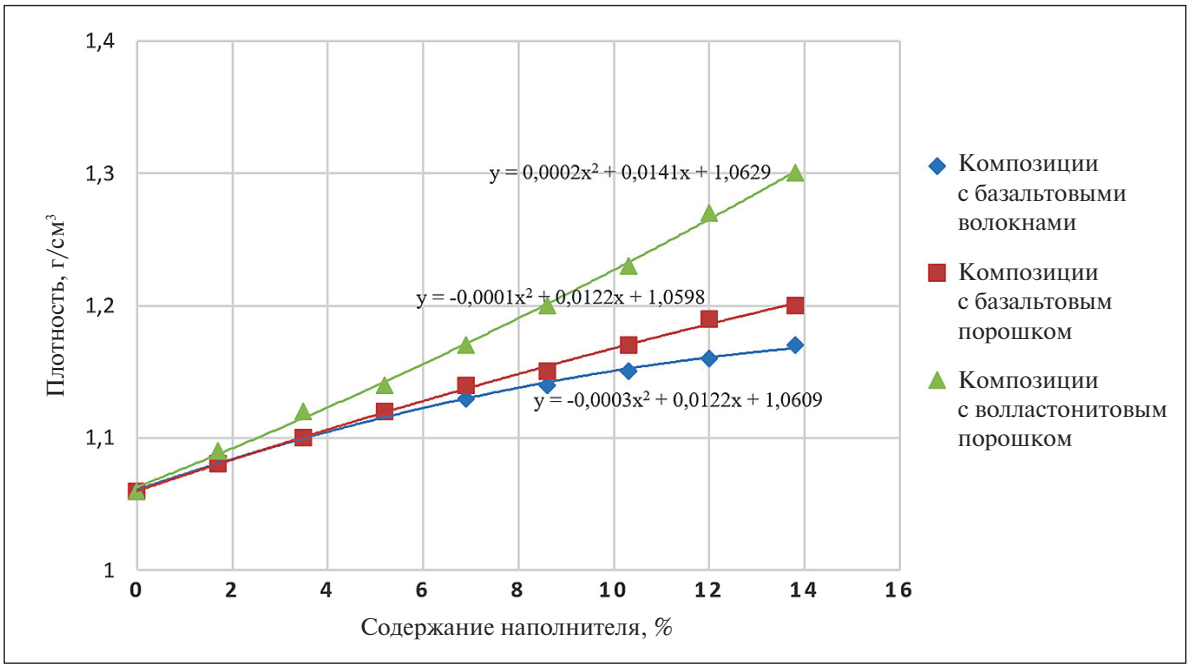


Рис. 2. Изменения плотности полимерных композитов в зависимости от процентных содержаний минеральных наполнителей

ется снижение плотности (кривая 2). Усредненные графики показывают прямолинейное поведение. Однако при добавлении тонкоизмельченного базальта в количестве 3–4% график изменения плотности становится нелинейным (линия принимает форму параболы), что указывает на значительное влияние на свойства композита.

Наблюдается, что увеличение процентного содержания минерального наполнителя в композите приводит к повышению плотности материала [25]. Например, введение до 14% наполнителей вызывает увеличение плотности на 10% и 15% для тонкоизмельченного базальта и на 17% для тонкоизмельченного волластонита. Увеличение процентного содержания наполнителя также повышает вязкость композиционного материала, что усложняет его обработку.

В табл. 3 представлены полученные результаты физико-технических характеристик композитов с минеральными наполнителями.

Тонкоизмельченный волластонит проявил себя как активный наполнитель для термопластов, обеспечивая увеличение предела прочности на растяжение композита на 22% в интервале содержания до 14%. Этот эффект объясняется математической зависимостью в виде полинома третьего порядка.

Тонкоизмельченный базальтовый камень не проявил себя как активный наполнитель для дивинилстирольной матрицы термоэластопласта. Уменьшение предела прочности на растяжение при увеличении содержания наполнителя описывается линейными уравнениями как для порошка, так и для коротких волокон. Уменьшение предела прочности композитов с короткими базальтовыми волокнами связано с их неравномерным распределением в объеме полимера: коэффициент –0,088φ для порошка по сравнению с коэффициентом –0,062φ для волокнистого наполнителя. Образование крупных агрегатов коротких базальтовых волокон затрудняет их равно-

Таблица 3. Физико-механические характеристики композитов с минеральными наполнителями

Композит	Содержание наполнителя % (мас.)	$\sigma_{раст.}$, МПа	$\varepsilon_{отн.}$, %	$\varepsilon_{ост.}$, %
Композит с тонкоизмельченным базальтом	4,7	3,7	266	20
	9	3,67	263	20,1
	13	3,65	260	20,4
	16,7	3,62	258	20,8
	20	3,6	256	21
	23	3,58	254	21,6
	25,9	3,53	253	22,2
	28,6	3,5	251	23
Композит с базальтовыми волокнами	4,7	3,68	265	20
	9	3,65	261	20
	13	3,63	260	21
	16,7	3,58	256	23
	20	3,53	254	24
	23	3,5	251	25
	25,9	3,43	245	27
	28,6	3,35	240	28
Композит с тонкоизмельченным волластонитом	4,7	3,72	268	20
	9	3,8	270	20,1
	13	3,84	273	20,3
	16,7	3,9	277	20,7
	20	4,0	280	21
	23	4,02	287	21,2
	25,9	4,05	295	21,7
	28,6	4,1	301	22

мерное распределение, что, в свою очередь, приводит к более значительному снижению предела прочности на растяжение, чем можно было бы ожидать исходя из линейной зависимости.

Из табл. 3 и рис. 3 видно, что добавление тонкоизмельченного базальта в композит привело к увеличению остаточного напряжения и снижению относительного удлинения. В то же время использование тонкоизмельченного волластонита в качестве наполнителя способствовало уменьшению остаточного удлинения, что повысило активность минеральных наполнителей в составе композита. Для получения более активных минеральных наполнителей была разработана гидрокавитационная мельница, работающая на основе явления кавитации.

Степени набухания композитов на основе минеральных наполнителей в техническом масле и уксусной кислоте представлены в табл. 4, а кинетика их набухания отображена на рисунках 4–8.

Исследования показали, что воздействие жидких сред на полимерные материалы может привести к двум типам межмолекулярного взаимодействия: ограниченному и неограниченному набуханию полимера.

Анализ кривых кинетики набухания полученных полимерных композитов с минеральными наполнителями в техническом масле показал, что все образцы композитов сохраняют стабильность при контакте продолжительностью до 24 часов (рис. 4–8). Однако дальнейшее набухание образцов, содержащих в качестве наполнителей волластонита и базальта с фракцией 2,5–1,25 мм, происходит быстрее, чем у образцов с размерами фракций менее 0,31 мм. Наибольшая степень набухаемости в техническом масле наблюдается у образцов композитов, содержащих кожевенную пыль и порошок угля в качестве наполнителей.

Результаты анализа рис. 4–8 указывают на то, что все составы композитов оказались стойкими к воздействию уксусной кислоты. Особенно высокую степень стойкости к уксусной кислоте проявил композит с тонкоизмельченным волластонитом в качестве наполнителя, в то время как композиты с угольным порошком оказались менее устойчивыми.

При экспозиции в бензине полученные полимерные композиты демонстрировали относительную устойчивость при коротком контакте (2–4 часа). Наиболее устойчивыми оказались композиты с тонкоизмельченным волластонитом при размерах фракций 2,5–1,25 мм. Однако при продолжительном контакте (4–8 часов) композиты стали липкими, потеряли форму и начали набухать. После погружения

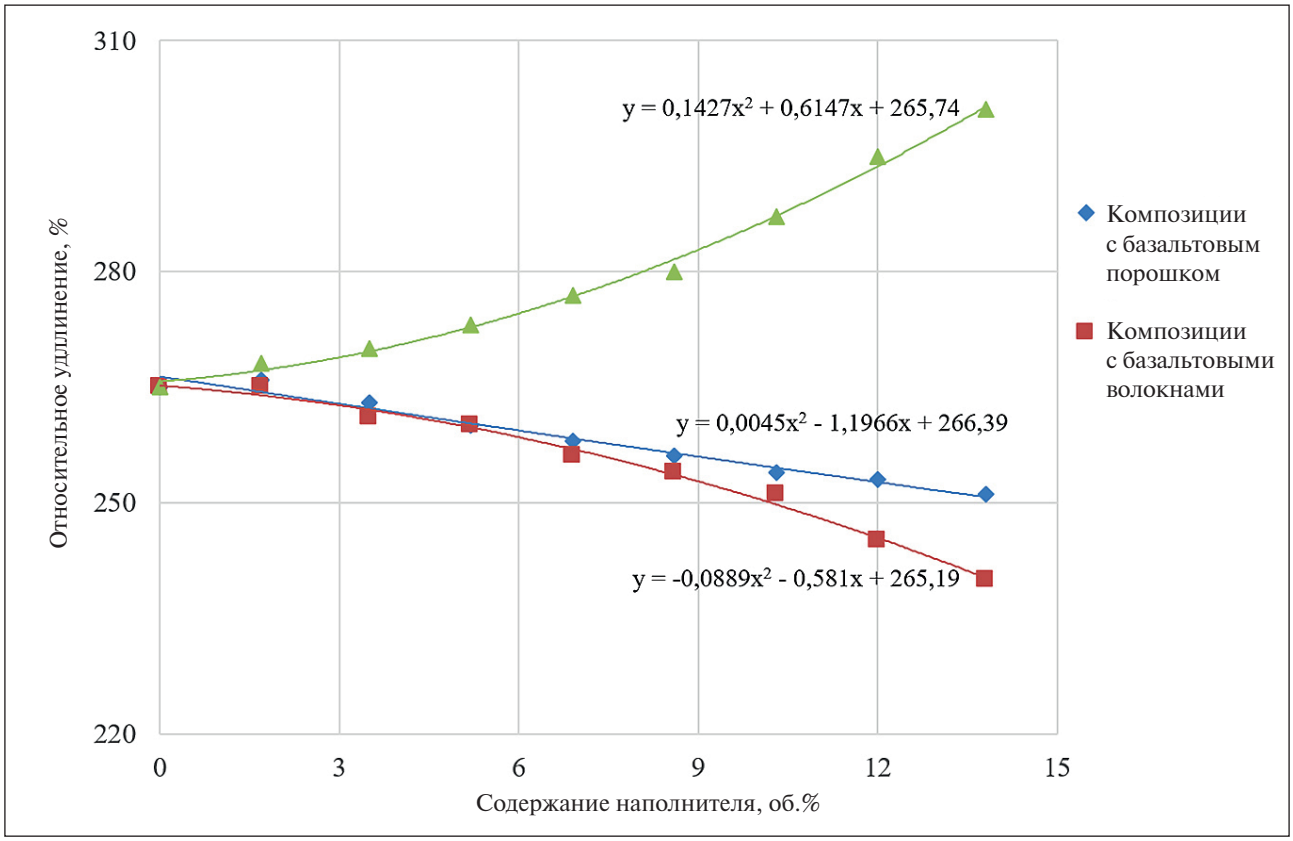


Рис. 3. Относительное удлинение композитов с минеральными наполнителями при разрыве, %

Таблица 4. Набухаемость полимерных композитов при различном содержании и различных фракциях наполнителей, %

Содержание и фракция наполнителя		Набухаемость, %							
Наполнитель, %	Фракций, мм	в техническом масле					в уксусной кислоте		
		8 ч	24 ч	48 ч	72 ч	96 ч	2 ч	8 ч	24 ч
Без наполнителя	0,00	6,4	12,6	22	28,4	28,3	2,6	5,2	8, 0
Тонкоизмельченный базальт при 25,0%	Состав фракций	4,2	10,3	19,6	24,6	25,4	1,7	4,3	7,7
	2,5–1,25	3,3	9,2	19,7	24,8	27	3,7	7,2	7,7
	1,25–0,31	5, 0	9,5	19,4	24, 1	26,3	2,2	4,0	6,9
	менее 0,31	6,2	9,7	17,4	23	24,2	2	3,3	6,4
Тонкоизмельченный базальт при 40,0%	Состав фракций	4,3	8,0	16,0	21,0	24,4	2,0	3,2	6,2
	2,5–1,25	2,8	8,4	16,7	22,4	25,1	2,0	3,5	6,4
	1,25–0,31	3,6	8,1	16,4	22,1	24,7	1,7	3,3	6,0
	менее 0,31	5,2	7,7	15,6	20,4	23,0	1,5	3,0	5,7
Тонкоизмельченный волластонит при 25,0%	Состав фракций	5,3	9,6	16,5	21,0	26,8	0,8	3,3	5,7
	2,5–1,25	7,2	14,3	25,1	32,2	32,3	1,0	3,3	9,7
	1,25–0,31	5,8	11,2	23,5	26,8	27,0	0,7	3,2	4,6
	менее 0,31	3,5	8,8	17,0	22,5	23,4	0,7	3,0	3,1
Тонкоизмельченный волластонит при 40,0%	Состав фракций	2,7	9,2	15,3	20,5	21,0	0,2	3,2	3,3
	2,5–1,25	2,7	7,9	15,8	21,0	22,1	0,1	3,1	3,5
	1,25–0,31	2,8	8,3	15,5	21,1	22,0	0,1	3,0	3,1
	менее 0,31	3,3	7,7	14,4	20,0	20,1	0,2	2,8	2,9
Угольная пыль при 25,0%	Состав фракций	13,8	19,0	31,1	41,5	41,6	6,7	10,1	20,1
Мраморная пыль при 25,0%	менее 0,31	4,6	9,1	21,3	27,4	28,0	3,4	6,7	16,7
Кожевенная пыль при 25,0%	Состав фракций	7,5	18,6	26,0	29,7	37,1	3,5	6,9	17,3

композитов в воду на 48 часов не наблюдалось изменений в их размерах и массе.

Далее был проанализирован фракционный состав тонкоизмельченных материалов, полученных на лабораторной гидрокавитаторной мельнице (рис. 1).

Электронная микроскопия поверхностей минеральных наполнителей получена на электронном растровом микроскопе Quanta 200i 3D, изображения представлены на рис. 9.

После дальнейшего измельчения тонкоизмельченного базальта с помощью гидрокавитационной мельницы размеры его частиц резко уменьшились с микронного диапазона до нанодиапазона (рис. 9). Размеры частиц составляют от 77 до 751 нм.

В ходе измельчения с помощью гидрокавитационной мельницы наблюдается увеличение содержания мелких фракций за счет разрушения крупных фракций минералов. На рис. 10 представлена динамика изменения размеров порошков.

После завершения гидрокавитационного измельчения состав фракций становится неоднородным. Преобладают фракции большого размера: 500÷700 и выше 700 нм. Мелкие фракции: 50÷100 и от 100÷300 нм составляют 30,0 % объема (рис. 10).

Результаты энергодисперсионной спектроскопии тонкоизмельченного базальта после процесса кавитационного измельчения представлены на рис. 11.

Сравнивая спектры тонкоизмельченного базальта до и после процесса измельчения в гидрокавитационной мельнице, мы наблюдаем увеличение содержания кислорода и углерода в 1,5–2 раза. Этот факт свидетельствует о том, что кавитация является не только физическим, но и физико-химическим процессом.

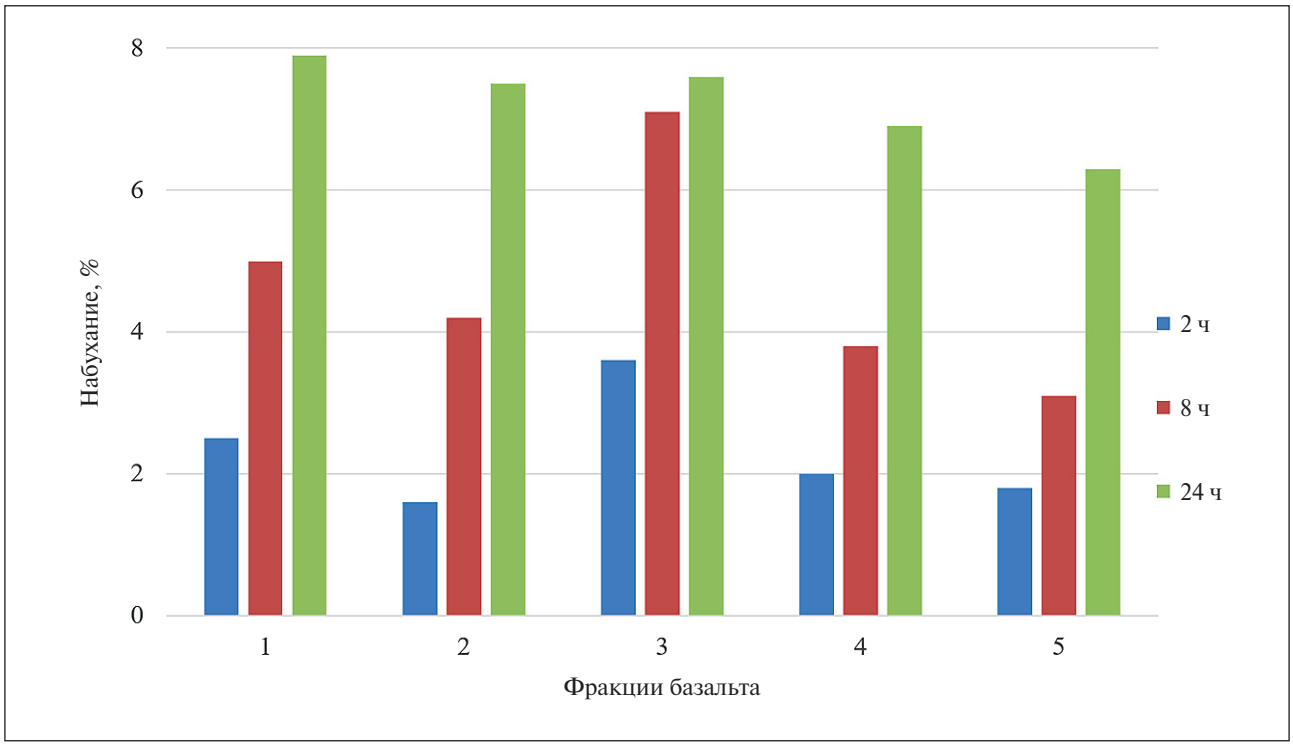


Рис. 4. Диаграмма набухания полимерного композита без наполнителя и с наполнителем (тонкоизмельченный базальт различных фракций – 25%): в уксусной кислоте, %: 1 – без наполнителя; 2 – состав фракций; 3 – фракция при 2,5–1,25 мм; 4 – фракций при 1,25–0,31 мм; 5 – фракция наполнителя меньше 0,31 мм

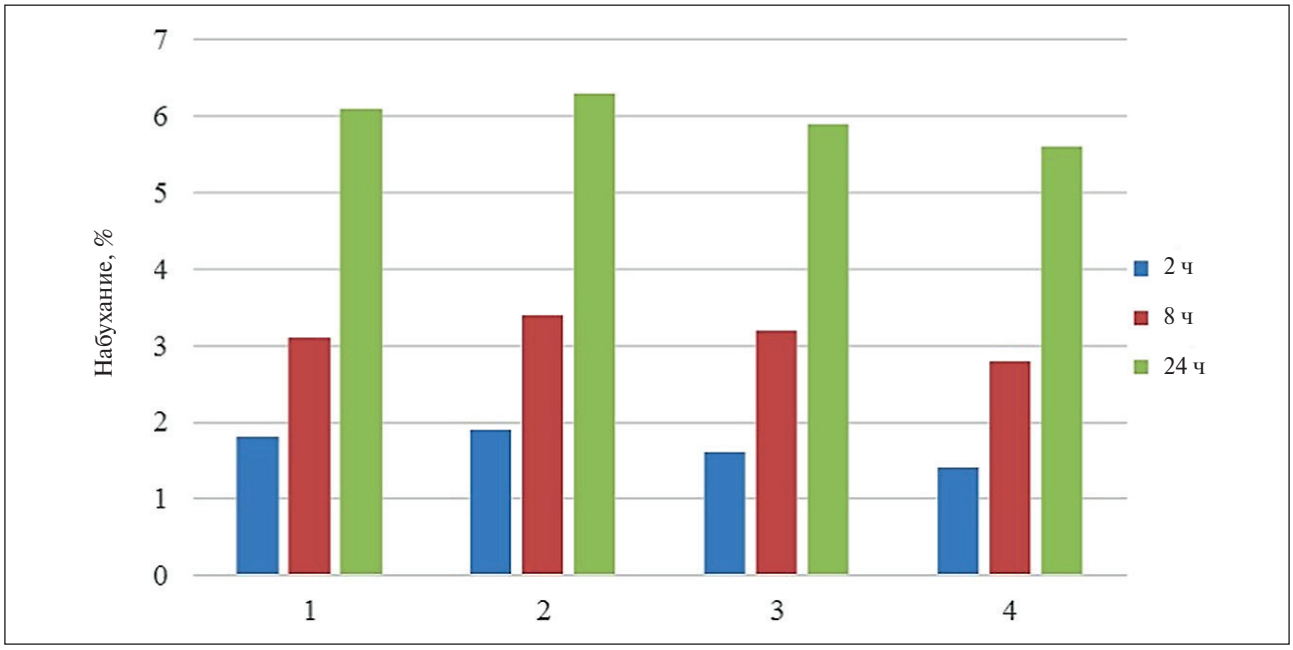


Рис. 5. Диаграмма набухания полимерного композита с тонкоизмельченным базальтом (40%) при различных фракциях в уксусной кислоте, %: 1 – состав фракций; 2 – размер фракций наполнителя 2,5–1,25 мм; 3 – размер фракций наполнителя 1,25–0,31 мм; 4 – размер фракций наполнителя при меньше 0,31 мм

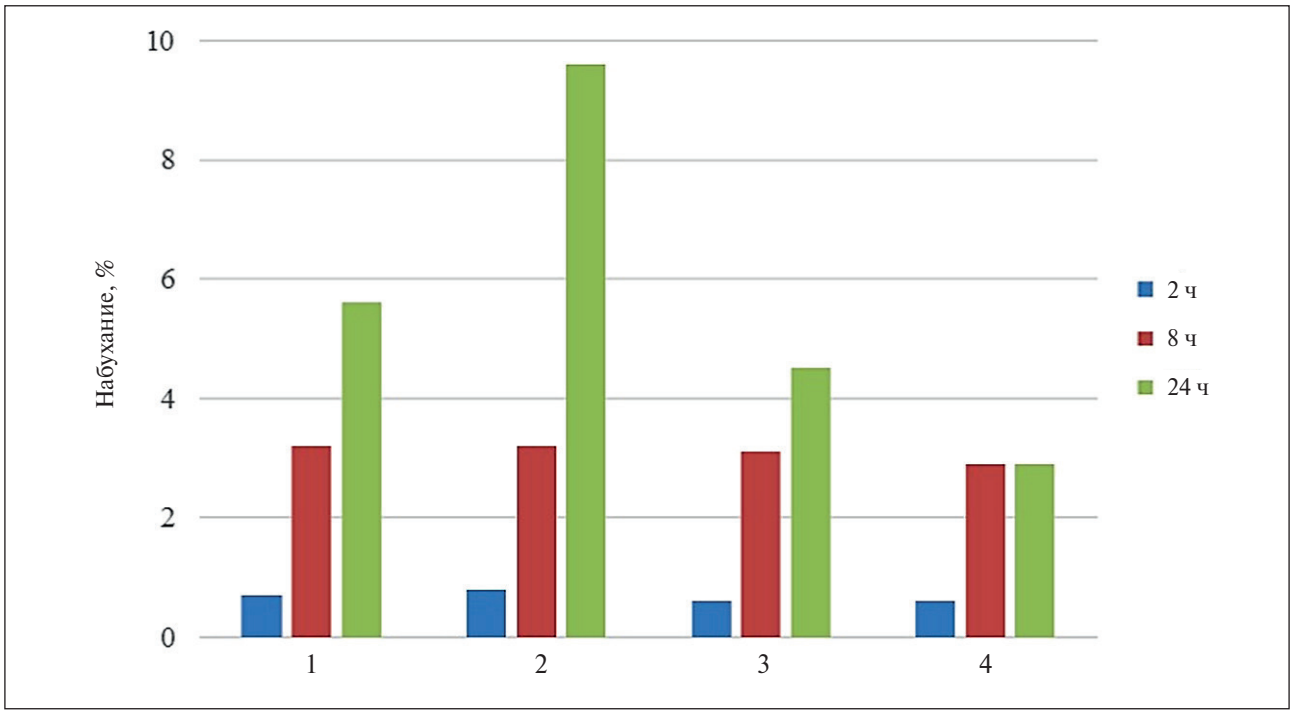


Рис. 6. Диаграмма набухания полимерного композита с тонкоизмельченным волластонитом (25,0%) при различных фракциях в уксусной кислоте, %: 1 – состав фракций; 2 – фракция наполнителя при 2,5–1,25 мм; 3 – фракция наполнителя при 1,25–0,31 мм; 4 – фракция наполнителя при менее 0,31 мм

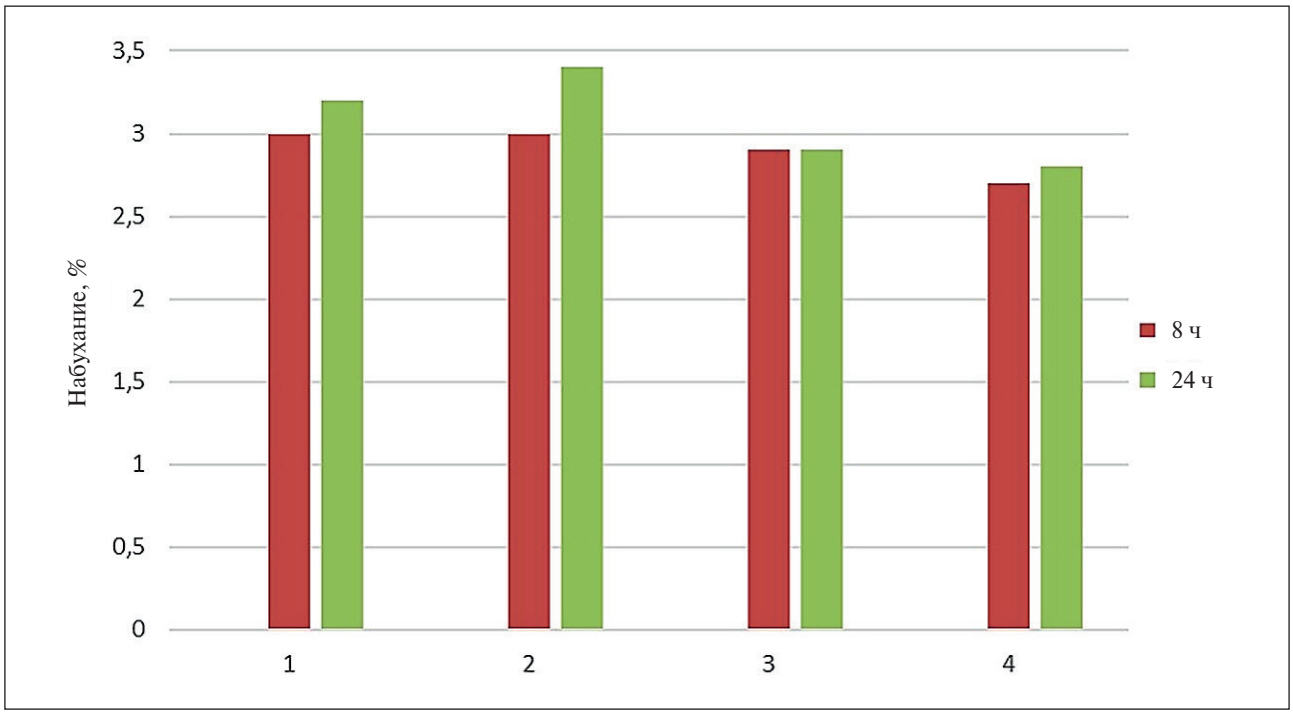


Рис. 7. Диаграмма набухания полимерного композита с тонкоизмельченным волластонитом (40,0%) различных размеров фракций в уксусной кислоте, %: 1 – смесь фракций; 2 – размер фракций наполнителя 2,5–1,25 мм; 3 – размер фракций наполнителя 1,25–0,31 мм; 4 – размер фракций наполнителя менее 0,31

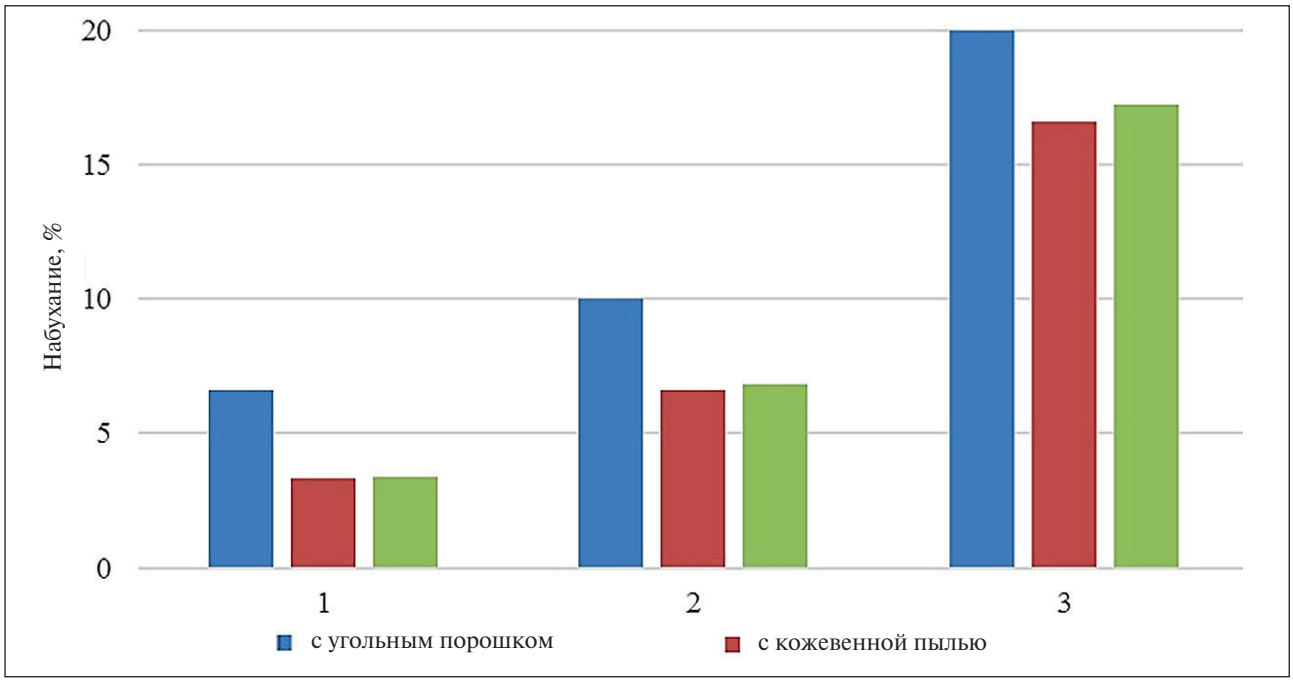


Рис. 8. Диаграмма набухания в уксусной кислоте полимерного композита с добавками различных наполнителей (25,0%), %: 1 – после 2 часа; 2 – после 8 часов; 3 – после 24 часа

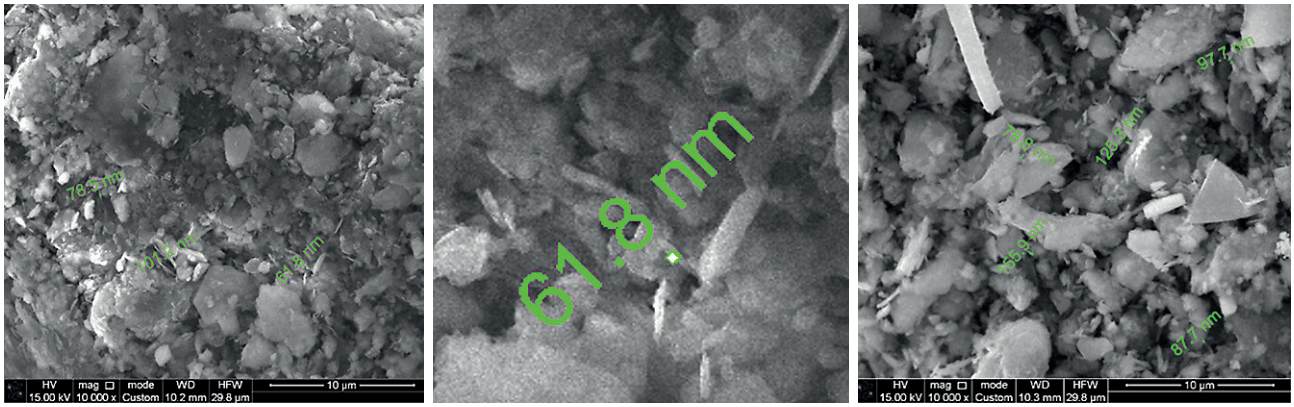


Рис. 9. Электронная микроскопия поверхностей минеральных наполнителей

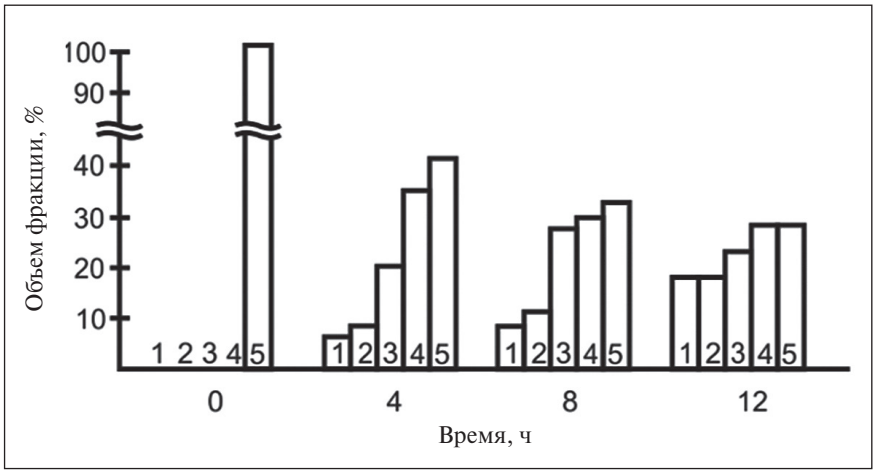


Рис. 10. Тонкоизмельченный базальтовый камень после кавитации:
1 – фракция от 50 до 100 нм;
2 – фракция 100÷300 нм;
3 – фракция 300÷500 нм;
4 – фракция 500÷700 нм;
5 – фракция выше 700 нм

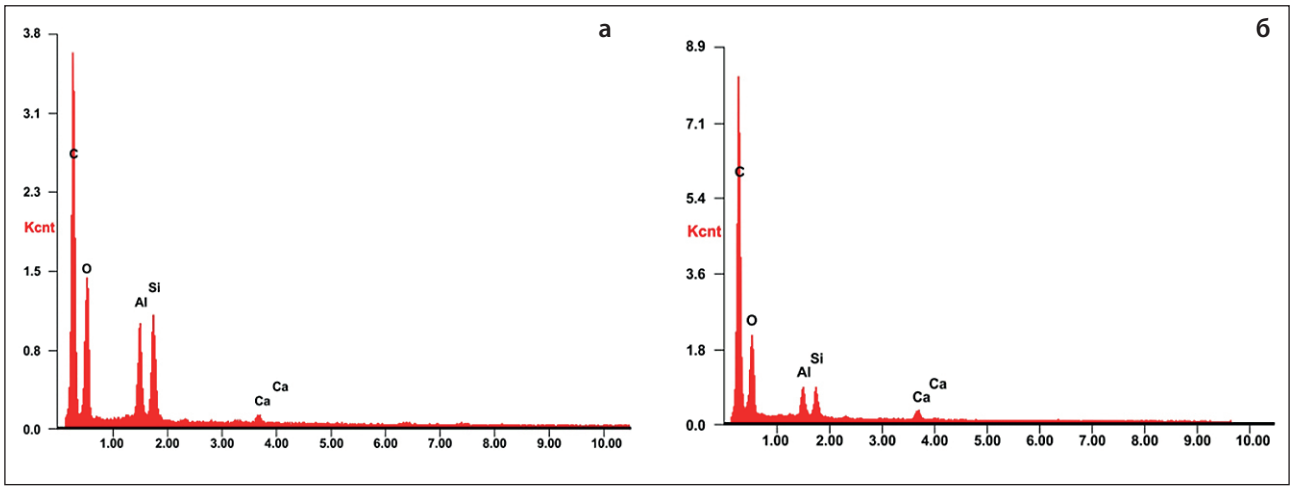


Рис. 11. Сравнительные EDS-спектры тонкоизмельченного базальта: а – после механического измельчения; б – после кавитационного измельчения

Процесс кавитации протекает при различной температуре и при сильном гидроударе исследуемого тонкоизмельченного порошка. Сочетание этих двух факторов приводит не только к механическому процессу измельчения, но и к протеканию физико-химических процессов переработки поверхности порошкообразных материалов.

В табл. 5 приведены физико-механические характеристики полимерных композитов с базальтовым порошком после процесса кавитации.

Как видно из табл. 5 и рис. 12, предел прочности на разрыв композита, содержащего тонкоизмельченный базальт, после кавитационной обработки увеличился.

В табл. 6 приведены физико-технические характеристики полученного полимерного композита с минеральными наполнителями.

Как видно из табл. 6, физико-технические характеристики полученных полимерных композитов с применением неорганических наполнителей соответствуют требованиям ГОСТ.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Были исследованы тонкоизмельченные наполнители на неорганической основе: базальтовый и волластонитовый камень, мраморная и угольная пыль. Результаты исследований показали, что использование неорганических наполнителей из минералов и горных пород Кыргызской Республики в составе полимерных композитов улучшает их физико-технические характеристики, а также позволяет сократить себестоимость полимерного композиционного материала.

2. Создана гидрокавитационная мельница для переработки тонкоизмельченных неорганических наполнителей, предназначенных для получения органических полимерных композитов с неорга-

Таблица 5. Физико-механические характеристики полимерных композитов с тонкоизмельченным базальтом после кавитационной мельницы

Содержание тонкоизмельченного базальта, в %	$\sigma_{раст.}$, МПа	$\varepsilon_{отн.}$, %	$\varepsilon_{ост.}$, %
4,9	3,9	271	19, 7
9,5	3,95	276,8	19,6
13, 4	4,6	282,5	19,3
16,9	4,7	287,6	20,8
20, 6	4,9	289,7	20,9
23, 5	4,97	295,6	21,4
26	5,4	303,5	22,4
28,7	5,3	315,4	22,5

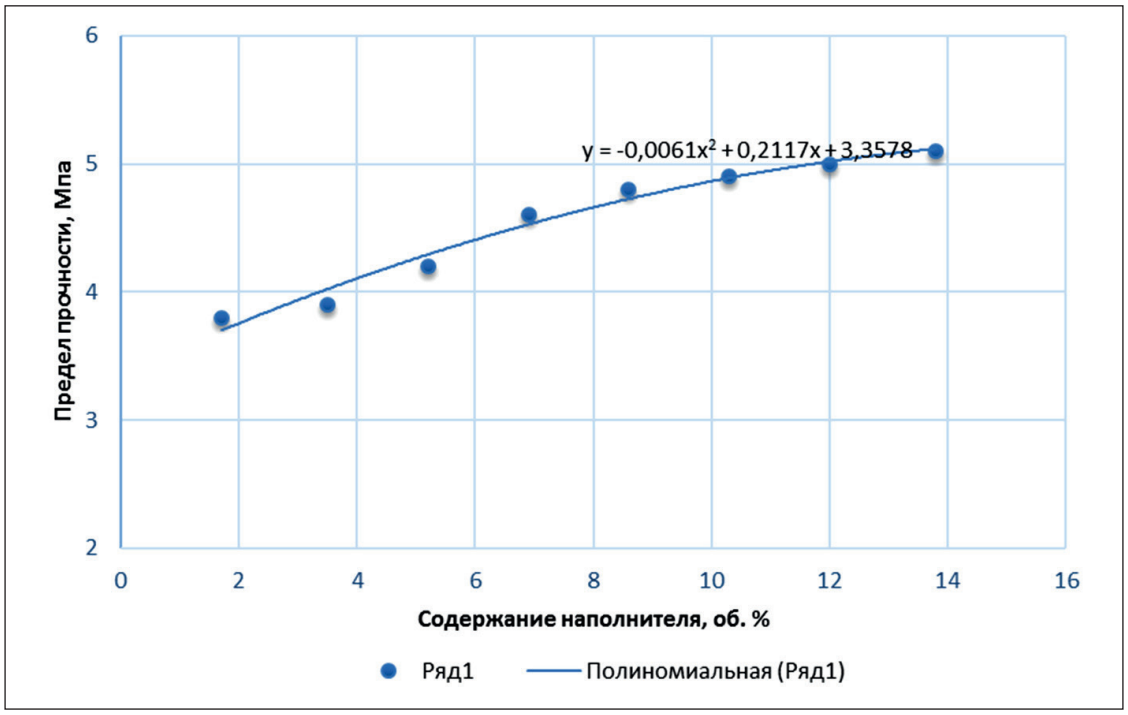


Рис. 12. Предел прочности на разрыв композита после кавитационной мельницы

Таблица 6. Физико-технические характеристики полимерных композитов с неорганическими наполнителями

№ п/п	Характеристики	Полимерный композит с неорганическими наполнителями		
		базальтовым	волластонитовым	угольным
1	Плотность, г/см³	1,14	1,12	0,98
2	Твёрдость по Шору, усл. ед.	63–65	59–62	60–63
3	Предел прочности при разрыве, МПа	4,9	5,50	4,1
4	Относительное удлинение при разрыве, %	290	342	246
5	Остаточное удлинение, %	19	18	22
6	Теплостойкость, °С	79	87	76

ническими добавками. С помощью этой мельницы были получены наполнители с размером частиц: 50–100 нм – 15%, 100–300 нм – 15%, 300–500 нм – 20%, 500–700 нм – 25% и более 700 нм – 25%.

3. Установлено, что использование тонкоизмельченных и переработанных порошков наполнителей после кавитационной обработки позволяет повысить предел прочности на растяжение до 5,1 МПа, а теплостойкость полимерных композитов на основе термоэластопластов — до 100–110 °С. Кроме того, это улучшает водостойкость и устойчивость к агрессивным средам, таким как техническое масло, уксусная кислота и бензин.

4. Исследованы физико-механические характеристик композитов с неорганическими наполнителями. Выявлено, что разработанные полимерные композиты с неорганическими наполнителями (базальт, волластонит, мрамор, угольная пыль) обладают комплексом физико-механических характеристик, удовлетворяющих требованиям стандартов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный: Интеллект. 2010;352.

2. Колосова А.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018;5(1):245-256.

3. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов. *Фундаментальные исследования*. 2017;10(3):459-465.

4. Li XuHui., Zhao Yi. Nanocomposite Building Materials in Modern Architectural Design. *Journal of Nanomaterials*. 2022;1169911,8. https://doi.org/10.1155/2022/1169911

5. Rathod V.T., Kumar J.S., Jain A. Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace applications. *Appl Nanosci*. 2017;**7**:519–548. https://doi.org/10.1007/s13204-017-0592-9

6. Lukuttsova N., Pykin A., Kleymenicheva Y., Suglobov A., Efremochkin R. Nano-additives for composite building materials and their environmental safety. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(11):7561–7565.

7. Rashid A.B., Haque M., Islam S.M.M., Uddin Labib K.M.R. Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications. *Heliyon*. 2024;10(2):e24692. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

8. Abdullaeva Z. *Nanomaterials for Building and Protection*. In: Nanomaterials in Daily Life. Publishing: Springer, Cham. 2017; 91-110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57216-1_5

9. Рогов В.А., Шкарупа М.И., Велис А.К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении. *Вестник РУДН,* серия Инженерные исследования. 2012;2:41-49.

10. Ершова О.В., Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015;4:14-18.

11. Мельниченко М.А., О.В. Ершова, Л.В. Чупрова. Влияние состава наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов. *Молодой ученый*. 2015;16(96):199-202.

12. Завьялова Н.Б., Строганов В.Ф., Строганов И.В., Ахметшин А.С. Исследование влияния природы наполнителей на прочностные свойства гетерофазных полимерных составов. *Известия КазГАСУ*. 2007;1(7):63-66.

13. Липатов Ю.С. Физико-химия наполненных полимеров. Киев: Изд. «Наукова думка», 1967.

14. Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., Nisa F.U. Fillers and methods to improve the effective (out-plane) thermal conductivity of polymeric thermal interface materials – A review. *Heliyon*. 2024;10(3):e25381. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25381

15. Lasrado D., Ahankari S., Kar K. Nanocellulose-based polymer composites for energy applications – a review. *J Appl Polym Sci*. 2020;137:48959. https://doi.org/10.1002/app.48959

16. Kwon Y.J., Park J.B., Jeon Y.P., Hong J.Y., Park H.S., Lee J.U. A Review of Polymer Composites Based on Carbon Fillers for Thermal Management Applications: Design, Preparation, and Properties. *Polymers (Basel)*. 2021;13(8):1312. https://doi:org/10.3390/polym13081312

17. Акунова М., Иманкулова А.С., Чимчикова М.К. Исследование различных видов наполнителей с целью применения их в композиционных материалах на основе полимеров. Материалы научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодёжь – движущая сила науки», КГТУ им. И. Раззакова, Ч. 2. Бишкек. 2017;116-120.

18. Абдыкалыков А.А., Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Абдиев М.С. Определение фракционного состава отходов сырья базальтового производства для получения композиционного состава. Вестник КГУСТА. Бишкек. 2019;1(63):137-144. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41132113

19. Aidaraliev Z., Rysbaeva I., Atyrova R., Abdykalykov A., Bekbolot kyzy B., Zholdoshova C., Sopubekov N., Kuduev A., Dubinin I., Abdullaeva Z. Suitability of Suluu-Terek Basalt Deposits for Stone Casting. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2022;10:1-14. https://doi:org/10.4236/jmmce.2022.101001

20. 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;15(6):574–582. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582 – EDN: SNRTSV.

21. 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;15(6):592–601. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-592-601 – EDN: SAVFFB

22. Макавецкас А.Р., Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Филиппов В.И., Лебедев Н.М. Влияние кавитации на технологические свойства рудного и нерудного минерального сырья. *Цветные металлы*. 2007;3:87–92.

23. Ершов В.А., Кондратьев В.В., Афанасьев А.Д. Сонохимическое диспергирование кварца с использованием эффектов кавитации. Вестник ИрГТУ. 2011;11(58):159-164.

24. Чимчикова М.К. Разработка композиционных материалов на основе термоэластопластов и минеральных наполнителей. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Кыргызстан, ОшГУ. 2023;148.

25. Чимчикова М.К., Карпухин А.А. Влияние минеральных наполнителей на теплостойкость полимерных композиционных материалов. *Бюллетень науки и практики*. 2022;8(8):403-408. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/40

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чимчикова Майрамкуль Камчибековна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Технология изделий легкой промышленности», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, mchimchikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0096-8930

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

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – доктор технических наук, профессор, руководитель НИР в НИИ «Сейсмостойкое строительство», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика**,** janlem@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1100-3237

Талгатбекова Акмаржан Женисбековна – кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой «Технология, конструирование изделий и товаров», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, akma.leo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4041-4545

Мамытов Анарбек Бейшебаевич – преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов» Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика, anarbek_m@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-8201-5622

ВКЛАД АВТОРОВ

Чимчикова М.К. – выполнение экспериментальной части исследования.

Рысбаева И.А. – разработка концепции исследования, научное редактирование текста, формулирование окончательных выводов.

Айдаралиев Ж.К. – научное руководство и участие в разработке концепции исследования.

Талгатбекова А.Ж. – сбор материала из литературных источников.

Мамытов А.Б. – написание текста и обработка полученных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.01.2025; одобрена после рецензирования 07.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION

CC BY 4.0

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82

An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar

Evgeny M. Devyatkin[1]*, **Azat S. Khismatullin**[2], **Sergey Yu. Poberezhsky**[1]

[1] Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
[2] Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

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

ABSTRACT

Introduction. In the construction of residential and industrial buildings, analyzing the underground layers of soil on which the foundation is built plays a crucial role. Due to poor-quality geological exploration of the earth's surface, the problem of karst sinkholes is revealed during the construction of residential and industrial buildings. The paper proposes to carry out work on strengthening water-saturated and unstable soils in order to prevent collapse during the construction and operation of facilities for various purposes. Drilling wells in the karst formation zone and injection of reinforcing material is the main way to protect against karst phenomena. The paper examines gas-liquid layers (karst voids) containing nanocrystals located in a gaseous or liquid medium. The study of hydrodynamic fields is an urgent task that has a significant impact on the design and operation of facilities. **Methods and materials.** The most effective way to protect against karst phenomena for already built or newly erected buildings and industrial facilities is to drill wells in the karst formation zone and inject reinforcing material. As a result of the study conducted after the introduction of nanosilicon into a cement mortar, it is found that the hardening time of cement decreases with an increase in the number of nanoparticles of nanosilicon, i.e. nanoparticles have a higher rate of hydration reaction compared with cement. When a reinforcing material in the form of nanosilicon with cement mortar is introduced into the rock thickness of the karst formation zone, forming a lower insulating and upper stabilizing layer that prevent water access to the karst at the depth of the karst rock and stabilize the surface. At the karst formation stage, located within the boundaries of the collapse prism and corresponding to the width of the lower layer, two layers of the upper and lower supporting layer are created. Groundwater flow channels from catchments to discharge zones are formed between rock-thick support layers and insulating stabilizers that support the natural hydrogeological regime of the rock strata containing karst water layers. As a result, the protective properties of the rock increase when signs of karst appear, the physico-chemical and bearing properties of the soil improve, the strength properties of the soil increase and the likelihood of landslides decreases. **Results.** Hydrodynamic fields during filtration of nanogasated liquids in karst voids have been theoretically studied. Discussions. By installing a permanent automated monitoring system for motion sensors, pressure and temperature of liquid and gas in karst voids on the control well, we will be able to monitor the dynamics of the main hydrodynamic parameters of karst voids, allowing us to assess the current regime of karst voids and, in case of danger, alert emergency services and residents of the house. By monitoring the operation of sensors using artificial intelligence, it is possible to predict the occurrence and development of critical situations. **Conclusion.** The addition of silica nanoparticles to the cement mortar changes the rheological properties of the mortar, affecting its viscosity and fluidity. Groundwater flow channels from catchments to discharge zones are formed between rock-thick support layers and insulating stabilizers that support the natural hydrogeological regime of the rock strata containing karst water layers.

KEYWORDS: nanotechnology, karst formation, nanostructure, velocity, well

FOR CITATION:
Devyatkin E.M., Khismatullin A.S., Poberezhsky S.Yu. An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar. *Nanotechnologies in construction.* 2025;17(1):74–82. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82. – EDN: STEEYJ.

© Devyatkin E.M., Khismatullin A.S., Poberezhsky S.Yu., 2025

INTRODUCTION

In the construction of residential and industrial buildings, an analysis of the underground layers of the earth on which the object stands plays an important role. Due to poor-quality geological exploration of the earth's surface, the problem of karst sinkholes is revealed during the construction of residential buildings and industrial buildings. The paper proposes to strengthen swampy and structurally unstable soils, preventing collapses during the construction and operation of facilities.

METHODS AND MATERIALS

Microsilicon was widely used after 1960 and at this time it is becoming in demand. However, this significantly complicates the process of preparing cement mortar, since, for example, additional technical equipment is required to introduce such an amount of solid, water-insoluble substances into the mixture into the well. Nanostructured silica is a highly active cement additive containing ultrathin particles, the main component of which is represented by an amorphous modification of silicon dioxide. The increase in the strength of the material is explained by the small particle size, which contributes to the interaction with calcium hydroxide and a significant compaction of the material structure. This process helps to increase the mechanical strength of the cement material, and microspheres fill the space formed as a result of hydration [12].

It is found in [13–14] that after the introduction of nanosilicon into cement mortar (NCCR), the cement solidification time decreases with an increase in the amount of silica nanoparticles. Consequently, nanomaterials have a higher rate of hydration reaction compared to cement.

Protection against karst manifestations under the foundation in residential and industrial buildings that have already been built or recently put into operation is based on drilling wells in this zone and pumping a cement solution containing silica nanoparticles (NCCR) into the rock thickness. When the NCCR is introduced into the rock thickness in the karst formation zone, two layers arise: the upper one is a bearing layer and the lower one is an insulating layer that restricts water access to the karst from below. The first well is drilled obliquely to the upper transition zone of the geological layer prone to karst formation, and the NCC is introduced to a depth of about 10 meters to create a lower insulating and stabilizing layer. The second inclined well is drilled under karst voids, in front of groundwater, and a liquid solution of NCCR with a thickness of about 5 meters is poured. The third well, the control one, is drilled vertically until the upper support and the lower insulation come into contact. Between the upper and lower layers in the middle karst layer, groundwater runoff channels arise from basins to discharge zones that support the natural hydrogeological regime of the karst layer layers.

As a result, the protective properties of the rock increase, the chemical and physical properties of the soil improve, the strength properties of the soil increase and the probability of landslides decreases.

The paper further proposes to investigate the gas-liquid layers in the control well, which are located in a gaseous or liquid medium. These systems can combine the properties of both gases and liquids, creating unique characteristics such as high fluidity and small particle size. The study of hydrodynamic fields in the filtration of non-carbonated liquids is an urgent task that has a significant impact on the design and operation of wells.

MATHEMATICAL FORMULATION OF THE PROBLEM

The task of studying the temperature field during filtration of carbonated liquid is an important task in describing the movement of fluid in karst voids. This is due to the fact that karst voids contain a significant amount of gas, due to which, under certain external and internal factors, the upper layer may collapse.

The saturation pressure is equal to the reservoir pressure, therefore, during the movement of water in a formation with karst voids, degassing occurs. Under these conditions, the temperature drops both due to heat absorption during the phase transition and due to atmospheric thermal effects of the gas phase, and the flow of the liquid phase causes an increase in temperature. At low gas solubility, the formation heats up, and at high gas-liquid flows it cools down.

When the saturation pressure is lower than the reservoir pressure, two water flow options are possible. The first option is a single-phase flow that heats up due to the pressure in the well greater than or equal to the saturation pressure, accompanied by heating due to the Joule-Thomson effect.

If the saturation pressure is in the gap between the pressure in the formation with karst voids and the pressure in the well, then a bidirectional flow is realized. In an area where the pressure exceeds the saturation pressure $P_s < P < P_h$, a single-phase flow occurs, accompanied by heating. In an area where the pressure is less than the saturation pressure $P_w < P < P_s$, A bi-directional, oncoming flow of water and gas is realized, accompanied by phase transitions, and a high gas solubility coefficient cools the flow.

The physical properties of water and gas in karst voids differ both in the depth of the formation and horizontally, that is, the karst layer is generally anisotropic. But for simplicity, we believe that the karst layer is porous and the surrounding rocks are homogeneous in hydrodynamic and thermophysical properties. We also believe that

the permeable layers are located horizontally and are surrounded from above and below by impermeable rocks with a solidified solution of NCCR.

Picture 1 shows the geometry of the problem under consideration, where the inflow of carbonated water occurs to a well of radius r_0.

When solving the problem, we use a cylindrical coordinate system, the axis z which coincides with the axis of the well, and point $z = 0$ is located in the center of the karst formation ($-h < z < h$), where h – the half-thickness (half-thickness) of the formation, and its thickness (or capacity) is equal to twice the half-thickness ($H = 2h$). Thermophysical properties along the vertical axis (thermal conductivity λ_z and thermal conductivity a_z) differ from the corresponding properties along the horizontal axis r (λ_r and a_r – accordingly). Assume that the pressure and temperature inside the formation do not depend on the angular coordinate φ. In the field of $z < h$ is impermeable rocks with thermophysical parameters are located (λ_{z1}, a_{z1}, λ_{r1}, a_{r1}), and in the field $z < -h$ – with thermophysical parameters (λ_{z2}, a_{z2}, λ_{r2}, a_{r2}).

In the area from the power supply circuit R_k up to the saturation radius r_s. A single-phase water flow is realized (on Fig. 1 – area I). Well pressure P_w is less saturation pressure P_s, achieved when $r = r_s$ in formation $-h < z < h$, where r_s – saturation radius. Hence on the area $r_0 < r < r_s$ there will be a two-phase flow of water and gas (in Fig. 1, this area is darkened, zone II).

Consider the energy equations of the carrier phase consisting of water, dissolved gas, free gas (pure gas) and the skeleton of a karst porous medium, transformed into one equation using a single-temperature approach.

The energy equation for the saturated phase is written as an equation with an index i. The value of index $i = 1$ corresponds to water, $i = 2$ – dissolved gas, $i = 3$ – free gas – gas phase:

$$c_i\rho_i s_i m\frac{\partial T_i}{\partial t}+\upsilon_i c_i\rho_i[grad\,T_i+\varepsilon_i grad\,P]-ms_i\rho_i c_i\eta_i\frac{\partial P}{\partial t}=$$
$$=div[(ms_i\lambda_i)grad\,T_i]-L_i q_i+\sum_{j\neq i}\theta_{ij}^{*}(T_i-T_j), \quad (1)$$

where L_i – specific heat of the phase transition i-th components, and q_i – volume density of the free gas source.

If we add up the formulas for the energy of all phases and components, making their temperatures equal, we get:

$$\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]\frac{\partial T}{\partial t}+\sum_i\upsilon_i\rho_i c_i(gradT+\varepsilon_i gradP)-$$
$$-\sum_i ms_i\rho_i c_i\eta_i\frac{\partial P}{\partial t}+\sum_i L_i q_i=div\left[\left(\sum_i ms_i\lambda_i+(1-m)\lambda_0\right)gradT\right]. \quad (2)$$

By converting, we get:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\sum_i\upsilon_i\rho_i c_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]}\nabla T+\frac{\sum_i\upsilon_i\rho_i c_i\varepsilon_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]}\nabla P-$$
$$-\frac{\sum_i ms_i\rho_i c_i\eta_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]}\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{Lq}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]}=$$
$$=\frac{div\left[\left(\sum_i ms_i\lambda_i+(1-m)\lambda_0\right)gradT\right]}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0\right]}. \quad (3)$$

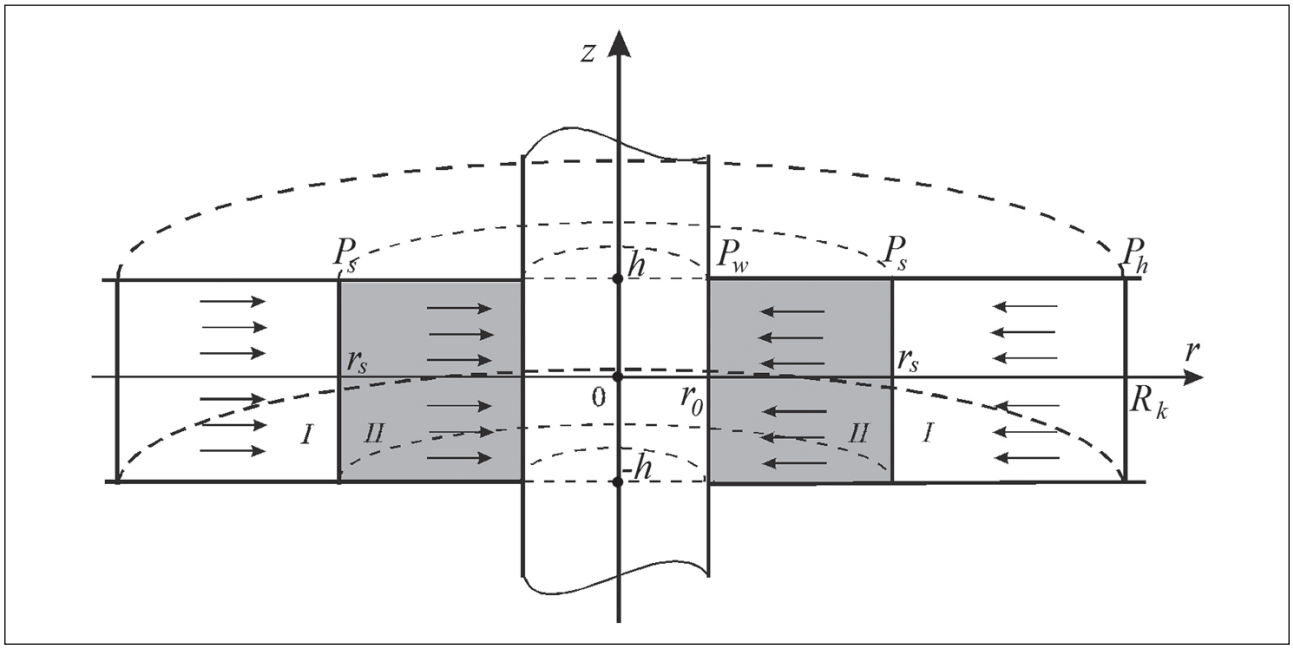


Fig. 1. Setting the problem

This equation can be presented in a form corresponding to a single-phase flow equation with effective parameters:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{U}_{ef}\left(\nabla T+\varepsilon_{ef}\nabla P\right)-\eta_{ef}\Pi\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{Lq}{c_n}=a_n\Delta T, \quad (4)$$

where

$$\Pi=\frac{\sum_i ms_i\rho_i c_i}{c_n},$$

$$a_n=\frac{\sum_i ms_i\lambda_i+(1-m)\lambda_0}{\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0},$$

$$c_n=\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0,$$

ε_{ef} – effective Joule-Thomson coefficient, $\vec{U}_{ef}$ – effective rate of convective heat transfer, η_{ef} – effective adiabatic coefficient.

The expression of the effective rate of convective heat transfer for a single-phase flow has the form:

$$\vec{U}_{ef}=\frac{\sum_i \vec{\upsilon}_i c_i\rho_i}{c_n}. \quad (5)$$

In an isotropic homogeneous medium, the vectors $\vec{U}_{ef}$ and $\vec{\upsilon}_i$ are collinear, since they obey Darcy's law, they thus coincide in direction with the pressure gradient:

$$\vec{\upsilon}_i=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)\nabla P=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)\left|\nabla P\right|\vec{n}=\upsilon_i\vec{n},$$

$$\upsilon_i=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)\left|\nabla P\right|, \quad (6)$$

where $\vec{n}$ – the unit vector in the direction of the pressure gradient.

If you convert the filtration rate formula i-th the phases in the formula for the effective convective heat transfer rate, we obtain:

$$\vec{U}_{ef}=-\frac{k}{c_n}\sum_i\frac{c_i\rho_i f_i(s)}{\mu_i}\left|\nabla P\right|\cdot\vec{n}. \quad (7)$$

The rate of convective heat transfer and the rate of phase filtration for a one-dimensional flow are also co-directional and directed along the axis r, that's why $\vec{\upsilon}_i=\upsilon_i\vec{e}_r$, $\vec{U}_{ef}=U_{ef}\vec{e}_r$, we get:

$$U_{ef}=\frac{\sum_i \upsilon_i c_i\rho_i}{c_n}. \quad (8)$$

If the consumption of carbonated liquid is equal $i=1$, 2, 3, then, taking into account the equality of the filtration rate of water and the gas dissolved in it, we get:

$$U_{ef}=\frac{(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\upsilon_1+c_3\rho_3\upsilon_3}{ms_1\rho_1c_1+ms_2\rho_2c_2+ms_3\rho_3c_3+(1-m)\rho_0c_0},$$

$$U_{ef}=-\frac{k}{c_n}\left[(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\frac{f_1(s)}{\mu_1}+c_3\rho_3\frac{f_3(s)}{\mu_3}\right]\frac{dP}{dr}. \quad (9)$$

For a homogeneous isotropic porous medium for the effective Joule–Thomson coefficient, substituting, we obtain

$$\varepsilon_{ef}=\frac{\sum_i \varepsilon_i\upsilon_i c_i\rho_i}{\sum_i \upsilon_i c_i\rho_i}. \quad (10)$$

If you express υ_i, then we get:

$$\varepsilon_{ef}=\frac{\sum_i \varepsilon_i c_i\rho_i f_i(s)/\mu_i}{\sum_i c_i\rho_i f_i(s)/\mu_i}. \quad (11)$$

In [4–13], it was shown that the value of the effective Joule-Thomson coefficient clearly does not depend on the permeability, pressure gradient, and heat capacity of a porous medium.

Consider the flow of carbonated liquid at $i=1$, 2, 3, given the equality of the filtration rate of water and the gas dissolved in it, we obtain:

$$\varepsilon_{ef}=\frac{(\varepsilon_1c_1\rho_1+\varepsilon_2c_2\rho_2)\upsilon_1+\varepsilon_3\upsilon_3c_3\rho_3}{(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\upsilon_1+\upsilon_3c_3\rho_3}. \quad (12)$$

The heat capacity of the karst layer of the formation is determined by the expression

$$c_n=ms_1\rho_1c_1+ms_2\rho_2c_2+ms_3\rho_3c_3+(1-m)\rho_0c_0. \quad (13)$$

When filtering carbonated liquid, the corresponding expression for the adiabatic coefficient is represented as:

$$\eta_{ef}=\frac{s_1\rho_1c_1\eta_1+s_2\rho_2c_2\eta_2+s_3\rho_3c_3\eta_3}{s_1\rho_1c_1+s_2\rho_2c_2+s_3\rho_3c_3}. \quad (14)$$

Theoretical and experimental studies of temperature fields during filtration of liquid and gas in a porous medium were carried out by A.I. Filippov, M.R. Minlibaev, E.M. Devyatkin, P.N. Mikhailov and others in 1980–2015 [8–14]. In the works of V.V. Dryagin, Ya.R. Adiev, A.A. Shilov, V.N. Fedorov, V.M. Meshkov, A.S. Bochkov, A.M. Sharipov, A.A. Sadretdinov, and others, temperature zones are taken into account during joint filtration of water and carbonated liquid [12–25].

The formula for the effective Joule–Thomson coefficient for filtering carbonated liquids is as follows:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\left(\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \frac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + \varepsilon_3 c_3 \left(\frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}\right)}{\left(c_1 + c_2 \frac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + c_3 \left(\frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}\right)},$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \xi_3 + \varepsilon_3 c_3 \xi_2}{c_1 + c_2 \xi_3 + \xi_2 c_3},$$

$$\xi_2 = \frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}, \ \xi_3 = \frac{\alpha P}{1-\alpha P}. \quad (15)$$

Due to the lack of degassing at high saturation pressures, the Joule-Thomson coefficient for filtration of carbonated water is as follows:

$$\varepsilon_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\left(\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \dfrac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + \varepsilon_3 c_3 \left(\dfrac{1}{1-\alpha P_s} - \dfrac{1}{1-\alpha P}\right)}{\left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + c_3 \left(\dfrac{1}{1-\alpha P_s} - \dfrac{1}{1-\alpha P}\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}}{c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}}, & P > P_s. \end{cases} \quad (16)$$

The formula for the effective Joule–Thomson coefficient of pressure has the form:

$$\eta_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\xi_1 \left(\rho_1 c_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 \eta_2\right) + \xi_2 \rho_3 c_3 \eta_3}{\xi_1 \left(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\rho_1 c_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 \eta_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}, & P > P_s. \end{cases} \quad (17)$$

The effective rate of convective heat transfer is written as:

$$U_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\rho_1 \upsilon_1 \left(c_1 + c_2 \xi_3 + c_3 \xi_2\right)\left(\xi_1 + \xi_2\right)}{m\rho_1 \xi_1 \left(c_1 + c_2 \xi_3\right) + m s_3 \rho_3 c_3 \xi_2 + (1-m)\rho_0 c_0 \left(\xi_1 + \xi_2\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\rho_1 \upsilon_1 \left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}\right)}{m\rho_1 \left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}\right) + (1-m)\rho_0 c_0}, & P > P_s. \end{cases} \quad (18)$$

RESULTS

In Fig. 2, curve 1, it can be seen that the temperature in the range $-1 < z < 1$ is constant.

The first decomposition coefficient in this range takes both negative and positive values (curve 2). To correct the correctness of the solution, we add the zero and the first approximation of the temperature distribution (curve 3), which is expressed as a function of the temperature field on z. Figure 2 shows that in the central part of the formation, for short times, the zero approximation describes the temperature distribution with a disadvantage, and at the edges of the formation with an excess. In environments, the zero approximation always gives an excessive temperature value.

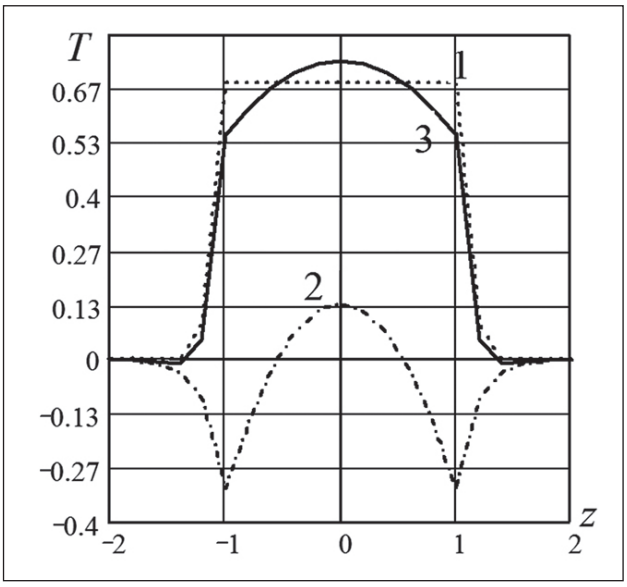


Fig. 2. Graphs of the dependence of dimensionless temperature T from the coordinate z in dimensionless coordinates: $h = 1$ м, $R_k = 50$ м, $t = 0.01$; $\varepsilon = 0.25$

DISCUSSION

By installing a permanent automated monitoring system for motion sensors, pressure and temperature of liquid and gas in karst voids on the control well, we will be able to monitor the dynamics of the main hydrodynamic parameters of karst voids, allowing us to assess the current regime of karst voids and, if danger arises, signal this.

Thus, using mathematical dependencies and data from the continuous monitoring system, we will be able to determine porosity, moisture content and gas content in the intermediate layer with karst voids.

CONCLUSION

The use of nanosilicon-cement mortar in the lower and upper layers allows:

- to increase the protective properties of rocks during karst phenomena;
- improve the reliability of the physical, chemical and bearing properties of the soil;
- to increase the strength characteristics of the soil;
- reduce the likelihood of emergencies:
- automate the technological process of hydrodynamic research in karst environments.

The addition of silica nanoparticles to the cement mortar changes the rheological properties of the mortar, affecting its viscosity and fluidity. This can improve filtration through porous materials. The presence of

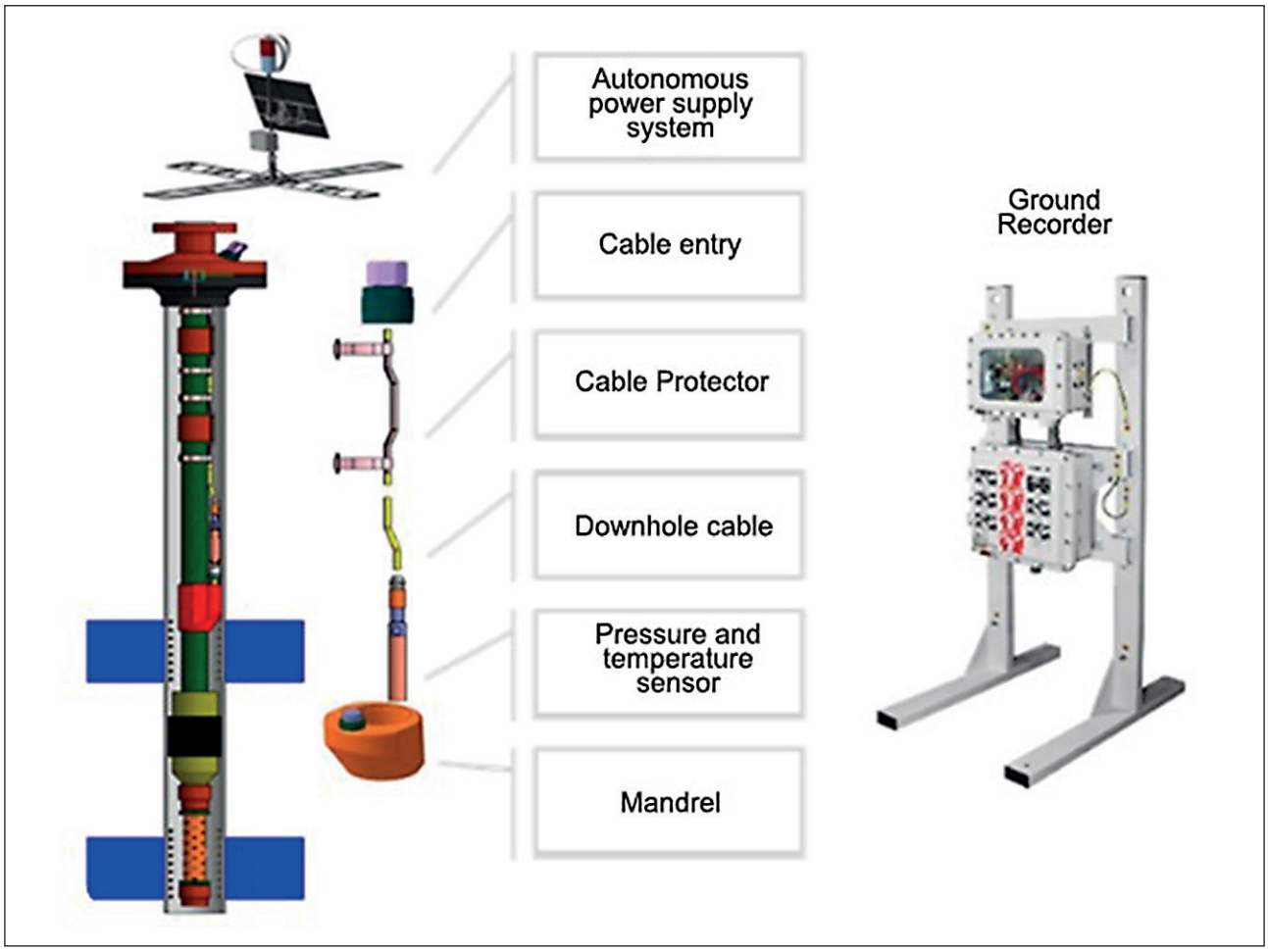


Fig. 3. Continuous monitoring system

gases in the liquid creates an additional lifting force effect and changes the flow behavior, which affects the pressure and filtration rate. A channel is formed between the dominant layer of the rock strata and the insulating stable layer for groundwater flow from the catchment area to the discharge zone, while maintaining the natural hydrogeological conditions of the rock strata, including the presence of water in the karst formation zone.

The advantages of using this development in construction:

- Consideration of hydrodynamic fields will help to design more stable foundations and structures, avoiding possible subsidence or destruction.
- Using nanotechnology to create sensors that will track changes in hydrodynamic fields and soil properties.
- The design of foundations taking into account the filtration properties of carbonated liquids to prevent subsidence and destruction.

The problem of filtration of carbonated liquid in karst voids is investigated. The resulting equation is used to calculate and analyze the spatiotemporal temperature distribution over time during filtration of carbonated liquid in karst voids. The study of hydrodynamic fields in the filtration of non-carbonated liquids is an urgent task that has a significant impact on the design and operation of wells.

REFERENCES

1. Poberezhsky S.Y. «Universal measuring pulse generator». Depositor. in VINITI 02.06.2014. № 152; 2014.
2. Poberezhsky S.Y. Thermal conductivity of binary solutions of organic liquids by Evell classification groups. Modern problems of science and education. 2014; 4. Access mode: http://www.science-education.ru/118-13977

3. Poberezhsky S.Y. «Experimental studies of the thermophysical properties of binary and ternary solutions of organic heat carriers». 10th International Conference «Aviation and Cosmonautics – 2011». Moscow: MAI, November 13-15;2011.

4. Khismatullin A.S. Method for increasing oil resources transformers with longterm operation. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; 022058. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022058

5. Filippov A.I., Mikhailov P.N., Khismatullin A.S. Filtration-wave heating of an oil reservoir. Engineering physics. 2006;5:13-21.

6. Filippov A.I., Devyatkin E.M. Barothermal effect in a gas-bearing stratum. High Temperature. 2001; 39(2): 255-263. https://doi.org/10.1023/A:1017526900775

7. Devyatkin E.M. Computer modeling of experimental problems in general physics. Modern problems of science and education. 2017; 6:178.

8. Filippov A.I., Mikhailov P.N., Bagautdinov R.N., Potapov A.A., Filippov K.A. Temperature fields in oil-gas beds exposed to the action of an acid. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005;78(2):256-271. https://doi.org/10.1007/s10891-005-0056-z

9. Filippov A.I., Mikhailov P.N. Specific features of the displacement of liquid during filtration in a low-porosity medium. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022;95(3):721-727. https://doi.org/10.1007/s10891-022-02529-4

10. Valiullin R., Ramazanov A., Khabirov T., Sadretdinov A., Kotlyar L., Sidorova M., Fedorov V., Salimgareeva E. Interpretation of non-isothermal testing data based on the numerical simulation. In the collection: Society of Petroleum Engineers - SPE Russian Conference on Petroleum Technologies; 2015. https://doi.org/10.2118/176589-MS

11. Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Sharafutdinov R.F. Thermal field in a well during induction heating of a casing string under conditions of low flow velocity. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2023;34(2):87-98. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3807

12. Valiullin R.A., Ramazanov A.Sh., Khabirov T.R., Sadretdinov A.A., Zakirov M.F., Sharafutdinov R.F., Yarullin R.K. The experience of using simulators in the interpretation of thermal and thermohydrodynamic studies. Proneft. Professionally about oil. 2022;7-1(23):99-109. https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-1-99-109

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. https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887

14. Vijayan D.S., Devarajan P., Sivasuriyan A. A review on eminent application and performance of nano-based silica and silica fume in the cement concrete. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023;56:103105. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103105

15. Zimina D.A., Zhapkhandaev C.A., Petrov A.A. Analysis of the Effect of Nanosilicates on the Strength and Porosity of Cement Stone, Key Engineering Materials. 2020;854:(175-181). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.175

16. Balea A., Blanco A., Negro C. Nanocelluloses: Natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review. Polymers 2019;11:518. https://doi.org/10.3390/polym11030518

17. Guo A., Sun Z., Sathitsuksanoh N., Feng H. A review on the application of nanocellulose in cementitious materials. Nanomaterials. 2020;10(12):2476. https://doi.org/10.3390/nano10122476

18. Berra M., Carassiti F., Mangialardi T., Paolini A., Sebastiani M. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes, Construction and Building Materials 2012;35:666-675. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132

19. Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Investigation of the thermal field in a well during the column motion of a liquid during induction action. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2023;34(3):153-164. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3896

20. Ramazanov A.S., Parshin A.V. Analytical model of temperature variations during the filtration of gas-cut oil. High Temperature. 2012;50(4):567-569. https://doi.org/10.1134/S0018151X12040189

21. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Zakirov M.F., Ramazanov A.S., Sadretdinov A.A., Khabirov T.R. Investigation temperature field in a horizontal well with multiple fractures. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences & Time for Breakthrough. 2018;44629. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800301

22. Mullakaev R.M., Mullakaev M.S. Ultrasound in the processes of purification of oil-contaminated wastewater: an overview. Ecology and industry of Russia. 2021; 25(3):53-59. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-53-59

23. Bashirov M.G., Bashirova E.M., Yusupova I.G., Akchurin D.Sh., Yulberdin R.T. Identification of the stress-strain state and damage to the metal structure of building structures with nanocoating by electromagnetic-acoustic

method. Nanotechnology in construction. 2023;15(5):482-493. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558

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. Transcilatory heat transfer in liquids with gas bubbles. Thermophysics and aeromechanics. 2012;19(5):595-612.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors state that generative artificial intelligence and AI-based technologies were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny M. Devyatkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of Department No. 915, Institute of General Engineering Training of the Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, mediadidaktika@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-6212-038X

Azat S. Khismatullin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of the Ufa State Petroleum Technical University in Salavat, Ufa, Russia, hism5az@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6397-2278

Sergey Yu. Poberezhsky – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department No. 915, Institute of General Engineering Training of the Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, ps801801@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-0213-4130

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS:

E.M. Devyatkin – scientific guidance; development of the concept and methodology of research; analysis of research results; writing an article; drawing up final conclusions.

A.S. Khismatullin – preparation and writing of the text of the section «Methods and materials»; data processing.

S.Y. Poberezhsky – literary review; theoretical analysis.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 14.11.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.02.2025.

Научная статья / Original article
УДК 504.75
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82

CC BY 4.0

Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором

Евгений Михайлович Девяткин[1]*, Азат Салаватович Хисматуллин[2], Сергей Юрьевич Побережский[1]

[1] Московский авиационный институт, Москва, Россия
[2] Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: mediadidaktika@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве жилых домов и промышленных зданий большую роль играет анализ подземных слоев земли, на котором стоит фундамент объекта. В связи с некачественной геологоразведкой поверхности земли при постройке жилых

домов и промышленных зданий обнаруживается проблема карстовых провалов. В работе предлагается провести работы по укреплению водонасыщенных и неустойчивых грунтов для того, чтобы предотвратить обрушение при строительстве и эксплуатации объектов различного назначения. Бурение скважин в зоне карстообразования и нагнетание укрепляющего материала является основным способом защиты от проявления карстовых явлений. В работе исследуются газожидкостные слои (карстовые путоты) с содержанием нанокристаллов, которые находятся в газообразной или жидкостной среде. Изучение гидродинамических полей является актуальной задачей, имеющей значительное влияние на проектирование и эксплуатацию объектов. **Методы и материалы.** Наиболее эффективным способом защиты от карстовых явлений для уже построенных или вновь возводимых зданий и промышленных объектов является бурение скважин в зоне карстообразования и нагнетание укрепляющего материала. В результате исследования, проведенного после введения нанокремнезема в цементный раствор, было установлено, что время затвердевания цемента сокращается с увеличением количества наночастиц нанокремнеземов, т.е. наночастицы обладают большей скоростью реакции гидратации по сравнению с цементом. Усиленный нанокремнеземом цементный раствор добавляется в породу карстовой зоны, образуя нижний изолирующий слой и верхний стабилизирующий слой, предотвращающий проникновение глубинных вод в карстовую зону и стабилизирующий поверхность карстовой породы. На стадии карстообразования, расположенной в границах призмы обрушения и соответствующей ширине нижнего слоя, создаются два слоя верхнего и нижнего поддерживающего слоя. Каналы стока грунтовых вод от водосборов к зонам разгрузки формируются между опорными слоями толщиной в породу и изолирующими стабилизаторами, которые поддерживают естественный гидрогеологический режим толщи пород, содержащих карстовые слои воды. В результате повышаются защитные свойства горной породы при проявлении признаков карста, улучшаются физико-химические и несущие свойства грунта, повышаются прочностные свойства грунта и снижается вероятность возникновения оползней. **Результаты.** Теоретически изучены гидродинамические поля при фильтрации наногазированных жидкостей в карстовых пустотах. **Обсуждение.** Установив на контрольную скважину постоянную автоматизированную систему контроля датчиков движения, давления и температуры жидкости и газа в карстовых пустотах, мы сможем контролировать динамику основных гидродинамических параметров карстовых пустот, позволяя оценивать текущий режим карстовых пустот и при возникновении опасности сигнализировать об этом экстренные службы и жильцов дома. С помощью мониторинга работы датчиков с применением искусственного интеллекта возможно прогнозировать возникновение и развитие критических ситуаций. **Выводы.** Добавление наночастиц кремнезема в цементный раствор изменяет реологические свойства раствора, влияя на его вязкость и текучесть. Каналы стока грунтовых вод от водосборов к зонам разгрузки формируются между опорными слоями толщиной в породу и изолирующими стабилизаторами, которые поддерживают естественный гидрогеологический режим толщи пород, содержащих карстовые слои воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнологии, карстообразования, наноструктура, скорость, скважина

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Девяткин Е.М., Хисматуллин А.С., Побережский С.Ю. Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):74–82. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82. – EDN: STEEYJ.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья / Original article
УДК 504.75
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82

CC BY 4.0

Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором

Евгений Михайлович Девяткин[1]*, Азат Салаватович Хисматуллин[2], Сергей Юрьевич Побережский[1]

[1] Московский авиационный институт, Москва, Россия
[2] Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: mediadidaktika@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве жилых домов и промышленных зданий большую роль играет анализ подземных слоев земли, на котором стоит фундамент объекта. В связи с некачественной геологоразведкой поверхности земли при постройке жилых домов и промышленных зданий обнаруживается проблема карстовых провалов. В работе предлагается провести работы по укреплению водонасыщенных и неустойчивых грунтов для того, чтобы предотвратить обрушение при строительстве и эксплуатации объектов различного назначения. Бурение скважин в зоне карстообразования и нагнетание укрепляющего материала является основным способом защиты от проявления карстовых явлений. В работе исследуются газожидкостные слои (карстовые путоты) с содержанием нанокристаллов, которые находятся в газообразной или жидкостной среде. Изучение гидродинамических полей является актуальной задачей, имеющей значительное влияние на проектирование и эксплуатацию объектов. **Методы и материалы.** Наиболее эффективным способом защиты от карстовых явлений для уже построенных или вновь возводимых зданий и промышленных объектов является бурение скважин в зоне карстообразования и нагнетание укрепляющего материала. В результате исследования, проведенного после введения нанокремнезема в цементный раствор, было установлено, что время затвердевания цемента сокращается с увеличением количества наночастиц нанокремнеземов, т.е. наночастицы обладают большей скоростью реакции гидратации по сравнению с цементом. Усиленный нанокремнеземом цементный раствор добавляется в породу карстовой зоны, образуя нижний изолирующий слой и верхний стабилизирующий слой, предотвращающий проникновение глубинных вод в карстовую зону и стабилизирующий поверхность карстовой породы. На стадии карстообразования, расположенной в границах призмы обрушения и соответствующей ширине нижнего слоя, создаются два слоя верхнего и нижнего поддерживающего слоя. Каналы стока грунтовых вод от водосборов к зонам разгрузки формируются между опорными слоями толщиной в породу и изолирующими стабилизаторами, которые поддерживают естественный гидрогеологический режим толщи пород, содержащих карстовые слои воды. В результате повышаются защитные свойства горной породы при проявлении признаков карста, улучшаются физико-химические и несущие свойства грунта, повышаются прочностные свойства грунта и снижается вероятность возникновения оползней. **Результаты.** Теоретически изучены гидродинамические поля при фильтрации наногазированных жидкостей в карстовых пустотах. **Обсуждение.** Установив на контрольную скважину постоянную автоматизированную систему контроля датчиков движения, давления и температуры жидкости и газа в карстовых пустотах, мы сможем контролировать динамику основных гидродинамических параметров карстовых пустот, позволяя оценивать текущий режим карстовых пустот и при возникновении опасности сигнализировать об этом экстренные службы и жильцов дома. С помощью мониторинга работы датчиков с применением искусственного интеллекта возможно прогнозировать возникновение и развитие критических ситуаций. **Выводы.** Добавление наночастиц кремнезема в цементный раствор изменяет реологические свойства раствора, влияя на его вязкость и текучесть. Каналы стока грунтовых вод от водосборов к зонам разгрузки формируются между опорными слоями толщиной в породу и изолирующими стабилизаторами, которые поддерживают естественный гидрогеологический режим толщи пород, содержащих карстовые слои воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнологии, карстообразования, наноструктура, скорость, скважина

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Девяткин Е.М., Хисматуллин А.С., Побережский С.Ю. Интеллектуальная система диагностики карстовых пустот, ограниченных слоями с наноцементным раствором. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):74–82. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82. – EDN: STEEYJ.

© Девяткин Е.М., Хисматуллин А.С., Побережский С.Ю., 2025

An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar

Evgeny M. Devyatkin[1]*, Azat S. Khismatullin[2], Sergey Yu. Poberezhsky[1]

[1] Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
[2] Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

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

ABSTRACT

Introduction. In the construction of residential and industrial buildings, analyzing the underground layers of soil on which the foundation is built plays a crucial role. Due to poor-quality geological exploration of the earth's surface, the problem of karst sinkholes is revealed during the construction of residential and industrial buildings. The paper proposes to carry out work on strengthening water-saturated and unstable soils in order to prevent collapse during the construction and operation of facilities for various purposes. Drilling wells in the karst formation zone and injection of reinforcing material is the main way to protect against karst phenomena. The paper examines gas-liquid layers (karst voids) containing nanocrystals located in a gaseous or liquid medium. The study of hydrodynamic fields is an urgent task that has a significant impact on the design and operation of facilities. **Methods and materials.** The most effective way to protect against karst phenomena for already built or newly erected buildings and industrial facilities is to drill wells in the karst formation zone and inject reinforcing material. As a result of the study conducted after the introduction of nanosilicon into a cement mortar, it is found that the hardening time of cement decreases with an increase in the number of nanoparticles of nanosilicon, i.e. nanoparticles have a higher rate of hydration reaction compared with cement. When a reinforcing material in the form of nanosilicon with cement mortar is introduced into the rock thickness of the karst formation zone, forming a lower insulating and upper stabilizing layer that prevent water access to the karst at the depth of the karst rock and stabilize the surface. At the karst formation stage, located within the boundaries of the collapse prism and corresponding to the width of the lower layer, two layers of the upper and lower supporting layer are created. Groundwater flow channels from catchments to discharge zones are formed between rock-thick support layers and insulating stabilizers that support the natural hydrogeological regime of the rock strata containing karst water layers. As a result, the protective properties of the rock increase when signs of karst appear, the physico-chemical and bearing properties of the soil improve, the strength properties of the soil increase and the likelihood of landslides decreases. **Results.** Hydrodynamic fields during filtration of nanogasated liquids in karst voids have been theoretically studied. Discussions. By installing a permanent automated monitoring system for motion sensors, pressure and temperature of liquid and gas in karst voids on the control well, we will be able to monitor the dynamics of the main hydrodynamic parameters of karst voids, allowing us to assess the current regime of karst voids and, in case of danger, alert emergency services and residents of the house. By monitoring the operation of sensors using artificial intelligence, it is possible to predict the occurrence and development of critical situations. **Conclusion.** The addition of silica nanoparticles to the cement mortar changes the rheological properties of the mortar, affecting its viscosity and fluidity. Groundwater flow channels from catchments to discharge zones are formed between rock-thick support layers and insulating stabilizers that support the natural hydrogeological regime of the rock strata containing karst water layers.

KEYWORDS: nanotechnology, karst formation, nanostructure, velocity, well

FOR CITATION:
Devyatkin E.M., Khismatullin A.S., Poberezhsky S.Yu. An intelligent diagnostic system for identifying karst voids enclosed by layers with nano-cement mortar. *Nanotechnologies in construction.* 2025;17(1):74–82. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-74-82. – EDN: STEEYJ.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве жилых домов и промышленных зданий большую роль играет анализ подземных слоев земли, на которой стоит объект. В связи с некачественной геологоразведкой поверхности земли при постройке жилых домов и промышленных зданий обнаруживается проблема карстовых провалов. В работе предлагается усиливать заболоченные и неустойчивые по структуре грунты, предотвращая обрушения при строительстве и эксплуатации объектов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Использовать микрокремнезем широко стали после 1960 г., и в данное время он становится востребован. Однако это значительно усложняет процесс приготовления цементного раствора, поскольку,

например для введения в скважину такого количества твердых, нерастворимых в воде веществ в смесь, требуется дополнительное техническое оборудование. Наноструктурированный кремнезем – это высокоактивная цементная добавка, содержащая ультратонкие частицы, основной компонент которых представлен аморфной модификацией диоксида кремния. Увеличение прочности материала объясняется малым размером частиц, что способствует взаимодействию с гидроксидом кальция и значительному уплотнению структуры материала. Этот процесс помогает повысить механическую прочность цементного материала, а микросферы заполняют пространство, образовавшееся в результате гидратации [12].

Обнаружено в работах [13–14], что после введения нанокремнезема в цементный раствор (НКЦР) время затвердевания цемента уменьшается с увеличением количества кремнезема наночастиц. Следовательно, наноматериалы имеют более высокую скорость реакции гидратации по сравнению с цементом.

Защита от карстовых проявлений под фундаментом в жилых и промышленных зданиях, которые уже построены или недавно введены в эксплуатацию, основывается в бурении скважин в этой зоне и закачке раствора цемента с содержанием наночастиц кремнезема (НКЦР) в толщу пород. При введении НКЦР в толще породы в зоне образования карста возникают два слоя: верхний – несущий слой – и нижний – изолирующий слой, ограничивающий доступ воды к карсту снизу. Первую скважину бурят наклонно к верхней переходной зоне геологического слоя, подверженного карстообразованию, вводят НКЦР на глубину примерно 10 метров для создания нижнего изолирующего и стабилизирующего слоя. Вторую наклонную скважину бурят под карстовыми пустотами перед грунтовыми водами, заливают жидкий раствор НКЦР толщиной около 5 метров. Третью скважину – контрольную – бурят вертикально до тех пор, пока верхняя опора и нижняя изоляция не соприкоснутся. Между верхним и нижним слоями в среднем карстовом слое возникают каналы стока подземных вод из бассейнов в зоны сброса, таким образом поддерживается естественный режим слоев в карстовом слое.

В результате защитные свойства породы повышаются, улучшаются химические и физические свойства грунта, повышаются прочностные свойства грунта и снижается вероятность обвалов.

В работе далее предлагаются исследовать газожидкостные слои в контрольной скважине, которые находятся в газообразной или жидкостной среде. Эти системы могут комбинировать свойства как газов, так и жидкостей, создавая уникальные характеристики, такие как высокая текучесть и малый размер частиц. Изучение гидродинамических полей при фильтрации наногазированных жидкостей является актуальной задачей, имеющей значительное влияние на проектирование и эксплуатацию скважин.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача исследования температурного поля при фильтрации газированной жидкости является важной задачей при описании движения флюида в карстовых пустотах. Это связано с тем, что карстовые пустоты содержат значительное количество газа, из-за которого при определенных внешних и внутренних факторах может обвалиться верхний слой.

Давление насыщения равно пластовому, поэтому во время движения воды в пласте с карстовыми пустотами происходит дегазация. В этих условиях температура падает как из-за поглощения тепла во время фазового перехода, так и из-за атмосферного теплового воздействия газовой фазы, а поток жидкой фазы вызывает повышение температуры. При низкой газорастворимости пласт нагревается, а при высоких газожидкостных потоках охлаждается.

При давлении насыщения ниже давления в пласте возможны два варианта течения воды. Первый вариант – возникает однофазный поток, который нагревается из-за давления в скважине, большем или равном давлению насыщения, сопровождаемым разогревом за счет эффекта Джоуля–Томсона.

Если давление насыщения находится в промежутке между давлением в пласте с карстовыми пустотами и давлением в скважине, то реализуется двунаправленное течение. В области, где давление превышает давление насыщения $P_s < P < P_h$, происходит однофазное течение, сопровождающееся разогревом. В области, где давление меньше давления насыщения $P_w < P < P_s$, реализуется двунаправленное встречное течение воды и газа, сопровождающееся фазовыми переходами, а высокий коэффициент растворимости газа охлаждает поток.

Физические свойства воды и газа в карстовых пустотах различаются как по глубине пласта, так и по горизонтали, то есть карстовый слой в общем случае анизотропно. Но мы для упрощения считаем, что карстовый слой – пористый и окружающие породы являются однородными по гидродинамическим и теплофизическим свойствам. Также считаем, что проницаемые пласты расположены горизонтально и окружены сверху и снизу непроницаемыми породами с застывшим раствором НКЦР.

На рис. 1 показана геометрия рассматриваемой задачи, где приток газированной воды происходит к скважине радиуса r_0.

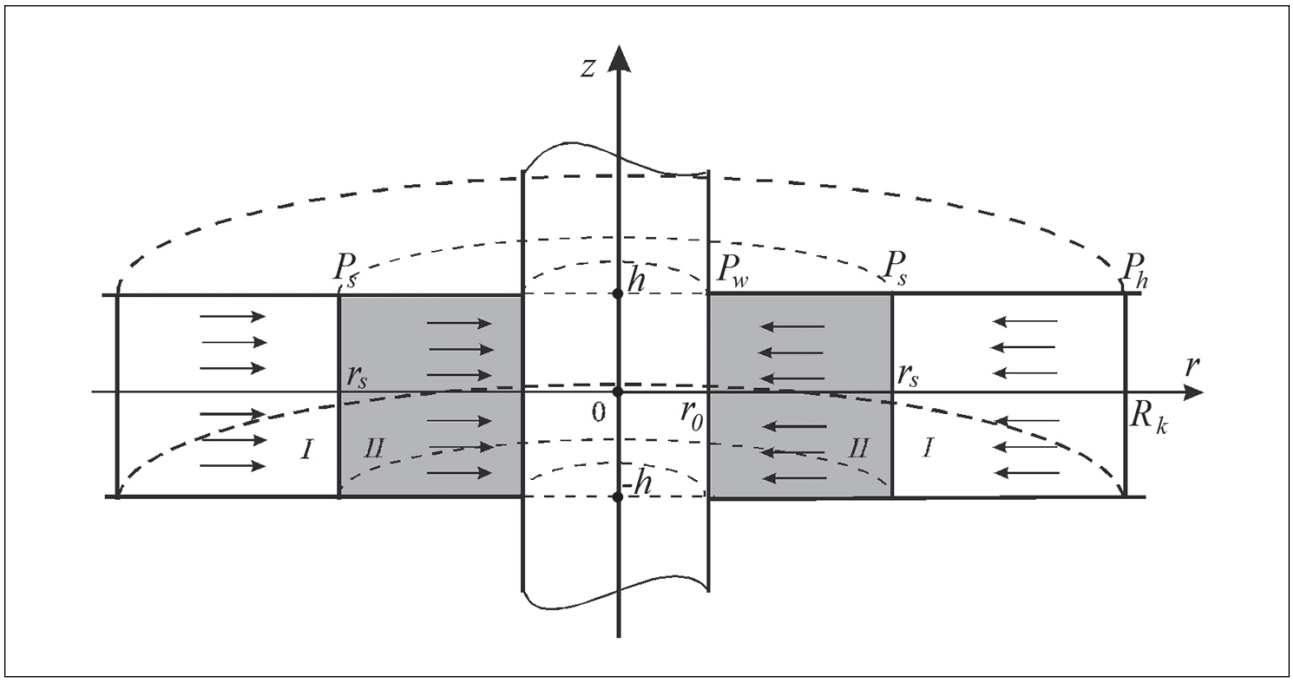


Рис. 1. Постановка задачи

При решении задачи используем цилиндрическую систему координат, ось z которой совпадает с осью скважины, а точка $z = 0$ расположена в центре карстового пласта ($-h < z < h$), где h – полутолщина (полумощность) пласта, а его толщина (или мощность) равна удвоенной полутолщине ($H = 2h$). Теплофизические свойства по вертикальной оси (теплопроводность λ_z и температуропроводность a_z) отличаются от соответствующих свойств вдоль горизонтальной оси r (λ_r и a_r – соответственно). Предположим, что давление и температура внутри пласта не зависят от угловой координаты φ. В области $z < h$ расположены непроницаемые породы с теплофизическими параметрами (λ_{z1}, a_{z1}, λ_{r1}, a_{r1}), а в области $z < -h$ – с теплофизическими параметрами (λ_{z2}, a_{z2}, λ_{r2}, a_{r2}).

В области от контура питания R_k до радиуса насыщения rs реализуется однофазное течение воды (на рис. 1 – зона I). Давление в скважине P_w меньше давления насыщения P_s, достигаемого при $r = r_s$ в пласте $-h < z < h$, где r_s – радиус насыщения. Следовательно, на области $r_0 < r < r_s$ будет двухфазное течение воды и газа (на рис. 1 эта область затемнена, зона II).

Рассмотрим уравнения энергии несущей фазы, состоящей из воды, растворенного газа, свободного газа (чисто газ) и скелета карстовой пористой среды, преобразованное в одно уравнение с помощью однотемпературного подхода.

Уравнение энергии для насыщенной фазы запишем в виде уравнения с индексом i. Значение индекса $i = 1$ соответствует воде, $i = 2$ – растворенному газу, $i = 3$ – свободному газу – газовой фазе:

$$c_i\rho_i s_i m\frac{\partial T_i}{\partial t}+\vec{\upsilon}_i c_i\rho_i\left[grad\,T_i+\varepsilon_i grad\,P\right]-ms_i\rho_i c_i\eta_i\frac{\partial P}{\partial t}=$$
$$=div\left[\left(ms_i\lambda_i\right)grad\,T_i\right]-L_i q_i+\sum_{j\neq i}\theta_{ij}^{*}\left(T_i-T_j\right), \quad (1)$$

где L_i – удельная теплота фазового перехода i-й компоненты, а q_i – объемная плотность источника свободного газа.

Если мы сложим формулы для энергии всех фаз и компонентов, сделав их температуры равными, получим:

$$\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]\frac{\partial T}{\partial t}+\sum_i\vec{\upsilon}_i\rho_i c_i\left(grad\,T+\varepsilon_i grad\,P\right)-$$
$$-\sum_i ms_i\rho_i c_i\eta_i\frac{\partial P}{\partial t}+\sum_i L_i q_i=div\left[\left(\sum_i ms_i\lambda_i+\left(1-m\right)\lambda_0\right)grad\,T\right]. \quad (2)$$

Преобразовав, получим:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\sum_i\vec{\upsilon}_i\rho_i c_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]}\nabla T+\frac{\sum_i\vec{\upsilon}_i\rho_i c_i\varepsilon_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]}\nabla P-$$
$$-\frac{\sum_i ms_i\rho_i c_i\eta_i}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]}\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{Lq}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]}=$$
$$=\frac{div\left[\left(\sum_i ms_i\lambda_i+\left(1-m\right)\lambda_0\right)grad\,T\right]}{\left[\sum_i ms_i\rho_i c_i+\left(1-m\right)\rho_0 c_0\right]}. \quad (3)$$

Это уравнение может быть представлено в форме, соответствующей однофазному уравнению потока с эффективными параметрами:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{U}_{ef}\left(\nabla T+\varepsilon_{ef}\nabla P\right)-\eta_{ef}\Pi\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{Lq}{c_n}=a_n\Delta T, \quad (4)$$

где

$$\Pi=\frac{\sum_i ms_i\rho_i c_i}{c_n},$$

$$a_n=\frac{\sum_i ms_i\lambda_i+(1-m)\lambda_0}{\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0},$$

$$c_n=\sum_i ms_i\rho_i c_i+(1-m)\rho_0 c_0,$$

ε_{ef} – эффективный коэффициент Джоуля–Томсона, $\vec{U}_{ef}$ – эффективная скорость конвективного переноса тепла, η_{ef} – эффективный адиабатический коэффициент.

Выражение эффективной скорости конвективного переноса тепла для однофазного течения имеет вид:

$$\vec{U}_{ef}=\frac{\sum_i \vec{\upsilon}_i c_i\rho_i}{c_n}. \quad (5)$$

В изотропной однородной среде векторы $\vec{U}_{ef}$ и $\vec{\upsilon}_i$ коллинеарны, поскольку подчиняются закону Дарси, таким образом, совпадают по направлению с градиентом давления:

$$\vec{\upsilon}_i=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)\nabla P=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)|\nabla P|\vec{n}=\upsilon_i\vec{n},$$

$$\upsilon_i=-\frac{k}{\mu_i}f_i(s)|\nabla P|, \quad (6)$$

где $\vec{n}$ – единичный вектор в направлении градиента давления.

Если преобразовать формулу скорости фильтрации i-той фазы в формулу для эффективной конвективной скорости теплопередачи, получим:

$$\vec{U}_{ef}=-\frac{k}{c_n}\sum_i\frac{c_i\rho_i f_i(s)}{\mu_i}|\nabla P|\cdot\vec{n}. \quad (7)$$

Скорость конвективного теплообмена и скорость фазовой фильтрации для одномерного потока также сонаправлены и направлены вдоль оси r, поэтому $\vec{\upsilon}_i=\upsilon_i\vec{e}_r$, $\vec{U}_{ef}=U_{ef}\vec{e}_r$, получим:

$$U_{ef}=\frac{\sum_i \upsilon_i c_i\rho_i}{c_n}. \quad (8)$$

Если расход газированной жидкости равны $i=1$, 2, 3, то, учитывая равенство скорости фильтрации воды и растворенного в ней газа, получим:

$$U_{ef}=\frac{(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\upsilon_1+c_3\rho_3\upsilon_3}{ms_1\rho_1c_1+ms_2\rho_2c_2+ms_3\rho_3c_3+(1-m)\rho_0c_0},$$

$$U_{ef}=-\frac{k}{c_n}\left[(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\frac{f_1(s)}{\mu_1}+c_3\rho_3\frac{f_3(s)}{\mu_3}\right]\frac{dP}{dr}. \quad (9)$$

Для однородной изотропной пористой среды для эффективного коэффициента Джоуля–Томсона, подставив, получим

$$\varepsilon_{ef}=\frac{\sum_i \varepsilon_i\upsilon_i c_i\rho_i}{\sum_i \upsilon_i c_i\rho_i}. \quad (10)$$

Если выразить υ_i, то получим:

$$\varepsilon_{ef}=\frac{\sum_i \varepsilon_i c_i\rho_i f_i(s)/\mu_i}{\sum_i c_i\rho_i f_i(s)/\mu_i}. \quad (11)$$

В работах [4–13] показано, что значение эффективного коэффициента Джоуля–Томсона явно не зависит от проницаемости, градиента давления и теплоемкости пористой среды.

Рассмотрим течения газированной жидкости при $i=1$, 2, 3, учитывая равенство скорости фильтрации воды и растворенного в ней газа, получим:

$$\varepsilon_{ef}=\frac{(\varepsilon_1c_1\rho_1+\varepsilon_2c_2\rho_2)\upsilon_1+\varepsilon_3\upsilon_3c_3\rho_3}{(c_1\rho_1+c_2\rho_2)\upsilon_1+\upsilon_3c_3\rho_3}. \quad (12)$$

Теплоемкость карстового слоя пласта определяется выражением

$$c_n=ms_1\rho_1c_1+ms_2\rho_2c_2+ms_3\rho_3c_3+(1-m)\rho_0c_0. \quad (13)$$

При фильтрации газированной жидкости соответствующее выражение для адиабатического коэффициента представляется в виде:

$$\eta_{ef}=\frac{s_1\rho_1c_1\eta_1+s_2\rho_2c_2\eta_2+s_3\rho_3c_3\eta_3}{s_1\rho_1c_1+s_2\rho_2c_2+s_3\rho_3c_3}. \quad (14)$$

Теоретические и экспериментальные исследования температурных полей при фильтрации жидкости и газа в пористой среде были проведены А.И. Филипповым, М.Р. Минлибаевым, Е.М Девяткиным, П.Н. Михайловым и др. в 1980–2015 гг. [8–14]. В работах В.В. Дрягина, Я.Р. Адиева, А.А. Шилова, В.Н. Федорова, В.М. Мешкова, А.С. Бочкова, А.М. Шарипова, А.А. Садретдинова и др. учтены

температурные зоны при совместной фильтрации воды и газированной жидкости [12–25].

Формула для эффективного коэффициента Джоуля–Томсона для фильтрации газированных жидкостей выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\left(\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \frac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + \varepsilon_3 c_3 \left(\frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}\right)}{\left(c_1 + c_2 \frac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + c_3 \left(\frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}\right)},$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \xi_3 + \varepsilon_3 c_3 \xi_2}{c_1 + c_2 \xi_3 + \xi_2 c_3},$$

$$\xi_2 = \frac{1}{1-\alpha P_s} - \frac{1}{1-\alpha P}, \; \xi_3 = \frac{\alpha P}{1-\alpha P}. \qquad (15)$$

Из-за отсутствия дегазации при давлениях, больших, чем давление насыщения, коэффициент Джоуля–Томсона при фильтрации газированной воды выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\left(\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \dfrac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + \varepsilon_3 c_3 \left(\dfrac{1}{1-\alpha P_s} - \dfrac{1}{1-\alpha P}\right)}{\left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P}{1-\alpha P}\right) + c_3 \left(\dfrac{1}{1-\alpha P_s} - \dfrac{1}{1-\alpha P}\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\varepsilon_1 c_1 + \varepsilon_2 c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}}{c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}}, & P > P_s. \end{cases} \qquad (16)$$

Формула эффективного коэффициента Джоуля–Томсона от давления имеет вид:

$$\eta_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\xi_1 \left(\rho_1 c_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 \eta_2\right) + \xi_2 \rho_3 c_3 \eta_3}{\xi_1 \left(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\rho_1 c_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 \eta_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}, & P > P_s. \end{cases} \qquad (17)$$

Эффективную скорость конвективного переноса тепла запишем в виде:

$$U_{ef} = \begin{cases} \dfrac{\rho_1 \upsilon_1 \left(c_1 + c_2 \xi_3 + c_3 \xi_2\right)\left(\xi_1 + \xi_2\right)}{m \rho_1 \xi_1 \left(c_1 + c_2 \xi_3\right) + m s_3 \rho_3 c_3 \xi_2 + (1-m) \rho_0 c_0 \left(\xi_1 + \xi_2\right)}, & P < P_s; \\ \dfrac{\rho_1 \upsilon_1 \left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}\right)}{m \rho_1 \left(c_1 + c_2 \dfrac{\alpha P_s}{1-\alpha P_s}\right) + (1-m) \rho_0 c_0}, & P > P_s. \end{cases} \qquad (18)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 (кривая 1) видно, что температура в диапазоне $-1 < z < 1$ постоянна.

Первый коэффициент разложения в этом диапазоне принимает как отрицательные, так и положительные значения (кривая 2). Для коррекции решения сложим нулевое и первое приближение распределения температуры (кривая 3), что выражается

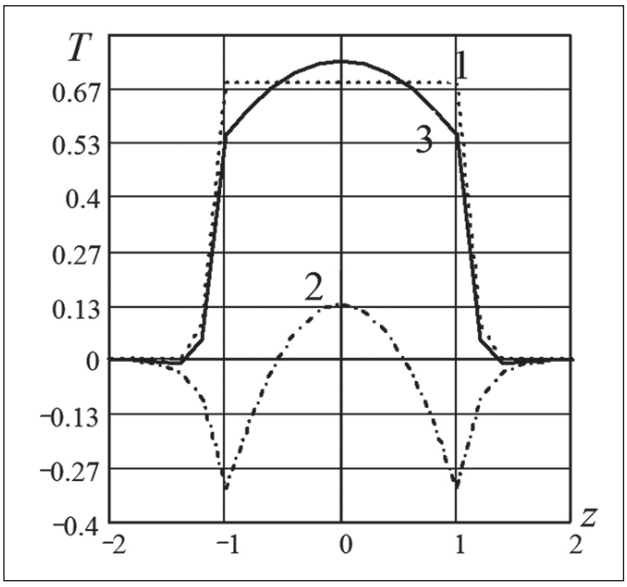


Рис. 2. Графики зависимости безразмерной температуры T от координаты z в безразмерных координатах: h = 1 м, R_k = 50 м, t = 0,01; ε = 0,25

в зависимости температурного поля от z. Из рис. 2 видно, что в центральной части пласта для малых времен нулевое приближение описывает распределение температуры с недостатком, а по краям пласта – с избытком. В окружающих средах нулевое приближение всегда дает избыточное значение температуры.

ОБСУЖДЕНИЕ

Установив на контрольную скважину постоянную автоматизированную систему контроля датчиков движения, давления и температуры жидкости и газа в карстовых пустотах, мы сможем контролировать динамику основных гидродинамических параметров карстовых пустот, позволяя оценивать текущий режим карстовых пустот и при возникновении опасности сигнализировать об этом.

Таким образом, используя математические зависимости и данные с системы постоянного мониторинга, мы сможем определить пористость, влагосодержание и газосодержание в промежуточном слое с карстовыми пустотами.

ВЫВОДЫ

Использование нанокремнеземно-цементного раствора в нижних и верхних слоях позволяет:

- увеличить защитные свойства горных пород при карстовых явлениях;
- повысить надежность физических, химических и несущих свойств почвы;
- повысить прочностные характеристики грунта;

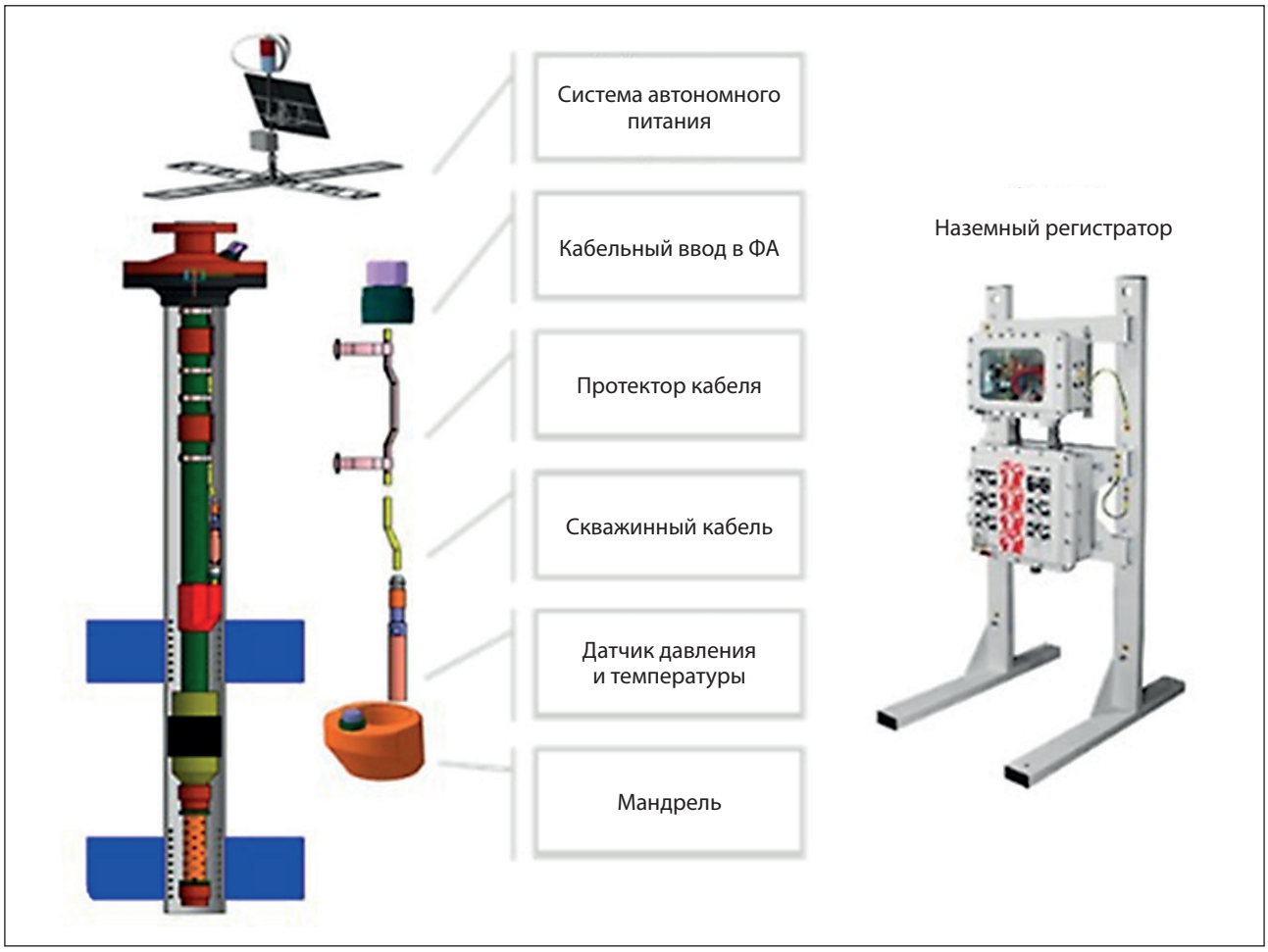


Рис. 3. Система постоянного мониторинга

– уменьшить вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций;
– автоматизировать технологический процесс гидродинамического исследования в карстовых средах.

Добавление наночастиц кремнезема в цементный раствор изменяет реологические свойства раствора, влияя на ее вязкость и текучесть. Это может улучшить фильтрацию через пористые материалы. Наличие газов в жидкости создает дополнительный эффект подъемной силы и изменяет поведение потока, что влияет на давление и скорость фильтрации. Между доминирующим слоем толщи горной породы и изолирующим стабильным слоем образуется канал для стока грунтовых вод из зоны водосбора в зону разгрузки, при этом поддерживаются естественные гидрогеологические условия толщи горной породы, включая наличие воды в зоне карстообразования.

Преимущества применения данной разработки в строительстве:

- Учет гидродинамических полей поможет проектировать более устойчивые фундаменты и сооружения, избегая возможных оседаний или разрушений.
- Использование нанотехнологий для создания сенсоров, которые будут отслеживать изменения в гидродинамических полях и свойствах грунта.
- Проектирование фундаментов с учетом фильтрационных свойств газированных жидкостей для предотвращения оседания и разрушений.

Исследована проблема фильтрации газированной жидкости в карстовых пустотах. Полученное уравнение используется для расчета и анализа пространственно-временного распределения температуры во времени при фильтрации газированной жидкости в карстовых пустотах. Изучение гидродинамических полей при фильтрации наногазированных жидкостей является актуальной задачей, имеющей значительное влияние на проектирование и эксплуатацию скважин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Побережский С.Ю. Универсальный генератор измерительных импульсов. *Депонир. в ВИНИТИ*. 02.06.2014. № 152 В2014.

2. Побережский С.Ю. Теплопроводность бинарных растворов органических жидкостей по группам классификации Эвелла [Электронный ресурс]. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;4:175. http://www.science-education.ru/118-13977

3. Побережский С.Ю. Экспериментальные исследования теплофизических свойств бинарных и тройных растворов органических теплоносителей. *10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011»*. М.: МАИ, 2011.

4. Khismatullin A.S. Method for increasing oil resources transformers with longterm operation. *In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 022058. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022058

5. Филиппов А.И., Михайлов П.Н., Хисматуллин А.С. Фильтрационно-волновой нагрев нефтяного пласта. *Инженерная физика*. 2006;5:13-21.

6. Filippov A.I., Devyatkin E.M. Barothermal effect in a gas-bearing stratum. *High Temperature*. 2001;39(2): 255-263. https://doi.org/10.1023/A:1017526900775

7. Девяткин Е.М. Компьютерное моделирование экспериментальных задач по общей физике. *Современные проблемы науки и образования*. 2017;6:178.

8. Filippov A.I., Mikhailov P.N., Bagautdinov R.N., Potapov A.A., Filippov K.A. Temperature fields in oil-gas beds exposed to the action of an acid. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005;78(2):256-271. https://doi.org/10.1007/s10891-005-0056-z

9. Filippov A.I., Mikhailov P.N. Specific features of the displacement of liquid during filtration in a low-porosity medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2022;95(3):721-727. https://doi.org/10.1007/s10891-022-02529-4

10. Valiullin R., Ramazanov A., Khabirov T., Sadretdinov A., Kotlyar L., Sidorova M., Fedorov V., Salimgareeva E. Interpretation of non-isothermal testing data based on the numerical simulation. *In the collection: Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Conference on Petroleum Technologies*; 2015. https://doi.org/10.2118/176589-MS

11. Акчурин Р.З., Давлетшин Ф.Ф., Рамазанов А.Ш., Шарафутдинов Р.Ф. Тепловое поле в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны в условиях низкой скорости потока. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(2):87-98. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3807

12. Валиуллин Р.А., Рамазанов А.Ш., Хабиров Т.Р., Садретдинов А.А., Закиров М.Ф., Шарафутдинов Р.Ф., Яруллин Р.К. Опыт использования симуляторов при интерпретации термических и термогидродинамических исследований. *PROнефть. Профессионально о нефти*. 2022;7.1(23):99-109. https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-1-99-109

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. https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887

14. Vijayan D.S., Devarajan P., Sivasuriyan A. A review on eminent application and performance of nano-based silica and silica fume in the cement concrete. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;56:103105. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103105

15. Zimina D.A., Zhapkhandaev C.A., Petrov A.A. Analysis of the Effect of Nanosilicates on the Strength and Porosity of Cement Stone, *Key Engineering Materials*. 2020;854:(175-181). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.175

16. Balea A., Blanco A., Negro C. Nanocelluloses: Natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review. *Polymers*. 2019;11:518. https://doi.org/10.3390/polym11030518

17. Guo A., Sun Z., Sathitsuksanoh N., Feng H. A review on the application of nanocellulose in cementitious materials. *Nanomaterials*. 2020;10(12): 2476. https://doi.org/10.3390/nano10122476

18. Berra M., Carassiti F., Mangialardi T., Paolini A., Sebastiani M. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes, *Construction and Building Materials*. 2012;35:666-675. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132

19. Давлетшин Ф.Ф., Рамазанов А.Ш., Акчурин Р.З., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф. Исследование теплового поля в скважине при заколонном движении жидкости в процессе индукционного воздействия. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;334 (3):153-164. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3896

20. Ramazanov A.S., Parshin A.V. Analytical model of temperature variations during the filtration of gas-cut oil. *High Temperature*. 2012;50(4):567-569. https://doi.org/10.1134/S0018151X12040189

21. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Zakirov M.F., Ramazanov A.S., Sadretdinov A.A., Khabirov T.R. Investigation temperature field in a horizontal well with multiple fractures. Saint Petersburg 2018: *Innovations in Geosciences & Time for Breakthrough*. 2018; 44629. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800301

22. Муллакаев Р.М., Муллакаев М.С. Ультразвук в процессах очистки нефтезагрязненных стоков: обзор. *Экология и промышленность России*. 2021;25(3):53-59. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-53-59

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 нанопокрытиями электромагнитно-акустическим методом. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(5):482-493. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-552-558

24. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Исследование переноса интегрального параметра в жидкости с газовыми пузырьками. *Экологические системы и приборы*. 2015;7:38-42.

25. Нигматулин Р.И., Филиппов А.И., Хисматуллин А.С. Трансцилляторный перенос тепла в жидкости с газовыми пузырьками. *Теплофизика и аэромеханика*. 2012;19(5):595-612.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Девяткин Евгений Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры № 915, Институт общеинженерной подготовки Московского авиационного института, Москва, Россия, mediadidaktika@mail.ru, https://orcid.org/0009- 0004-6212-038X

Хисматуллин Азат Салаватович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Уфа, Россия, hism5az@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6397-2278

Побережский Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры № 915, Институт общеинженерной подготовки Московского авиационного института, Москва, Россия, ps801801@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-0213-4130

ВКЛАД АВТОРОВ

Девяткин Е.М. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования; написание статьи; составление итоговых выводов.

Хисматуллин А.С. – подготовка и написание текста раздела «Методы и материалы»; обработка данных.

Побережский С.Ю. – литературный обзор; теоретический анализ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

SYSTEM SOLUTIONS FOR TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94

CC BY 4.0

Low carbon footprint building materials using industrial waste

Lam V. Tang[1], Dung T. Nguyen[1], Boris I. Bulgakov[2], Olga V. Aleksandrova[2]*

[1] Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), Hanoi, Vietnam
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

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

ABSTRACT

Introduction. The possibility of producing construction materials in Vietnam based on man-made waste with a low carbon footprint and capable of absorbing carbon dioxide is being considered in order to achieve zero greenhouse gas emissions by 2050. To date, insufficient attention has been paid to the search for a solution to this problem. **Methods and materials.** Studies were conducted to assess the possibility of obtaining a "green" cement-free concrete material using local industrial and agricultural waste in the form of fly ash and bottom slag from the Green Star incineration plant, alumina sludge, ceramic waste, lime powder and coconut fiber combined with a special activating agent. an alkaline solution. The average density, compressive strength, and water absorption of the developed cement-free concrete were determined on cube samples measuring 100×100×100 mm in accordance with the requirements of current Vietnamese standards. The ability of the resulting concrete to absorb carbon dioxide was evaluated using the developed method by measuring the mass of carbon dioxide absorbed by concrete samples. Results and discussion. The average density of the developed concrete is 1950 kg/m^3; compressive strength at the age of 28 days is 7.5–11.5 MPa; water absorption is 8–10% by weight. The main advantages of using cement-free concrete of the developed composition include reducing the carbon footprint due to the abandonment of the use of Portland cement, the ability of concrete to absorb carbon dioxide and the possibility of recycling high-tonnage man-made waste during its manufacture. **Conclusion.** The results of the conducted research show that the use of the developed cement-free "green" concrete for the manufacture of building products and structures in Vietnam will allow to recycle about 1.1 tons. high-tonnage industrial waste per 1 cubic meter and absorb 10–13 kg of carbon dioxide during operation. This will contribute to the implementation of the planned course for the "green" transformation of Vietnam's economy into a sustainable closed-loop economy.

KEYWORDS: environmental protection, high-tonnage industrial waste, greenhouse gas emissions, carbon footprint reduction, "green" cement-free building materials, fly ash, finely ground bottom slag, slurry waste from alumina production, powdered ceramic waste, lime powder, coconut fiber, activating alkaline solution

FOR CITATION:
Tang V.L., Nguyen T.D., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Low carbon footprint building materials using industrial waste. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):83–94. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94. – EDN: WQGUWO.

INTRODUCTION

As the urgent environmental problems of our planet become more global and require an immediate search for rational solutions, the construction industry, characterized by high levels of environmental pollution from industrial waste and significant emissions of greenhouse gases into the atmosphere, primarily CO_2, is gradually shifting to the use of environmentally friendly building materials and efficient construction technologies. with a low carbon footprint. A set of effective and economically justified measures will prevent further thinning of the ozone layer, reduce greenhouse gas emissions and stabilize their concentration in the atmosphere [1–10].

The construction sector is the world's largest consumer of raw materials, and the operation of buildings and structures for various purposes is characterized by the highest energy consumption in the world. This has allowed a stable opinion to develop and exist that one of the leading types of human activity leading to global warming and causing drastic climate change on our planet

© Tang V.L., Nguyen T.D., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V.,2025

is the currently observed high global construction rate [11, 12].

Reducing greenhouse gas emissions (carbon dioxide, methane, nitrogen oxides, etc.) is currently a serious global global problem that requires effective solutions in all industrialized countries, including the Russian Federation and Vietnam.

The 26th UN Climate Change Conference, held from October 31 to November 12, 2021 in Glasgow (Great Britain) with the participation of 25,000 delegates from 200 countries, including about 120 heads of state, discussed the following three most important and pressing issues facing the world community:

1. Reducing emissions of methane, one of the most harmful greenhouse gases, which significantly contributes to climate warming. As a result of the discussion, more than 100 world leaders signed an agreement to reduce meth emissions by 30% by 2030.

2. The gradual abandonment of the use of coal during the 40s of the XXI century, since it is the most "dirty" source of fossil fuels, as a result of burning which generates and releases into the atmosphere a large amount of greenhouse gases and, first of all, carbon dioxide. More than 40 countries, including Canada, Poland, Ukraine, the Republic of Korea, Indonesia and Vietnam, have committed themselves to completely abandon coal-fired power within the specified time frame.

3. Conservation of forests on our planet, as forests play a critical role in the carbon cycle by absorbing carbon dioxide from the atmosphere. The leaders of more than 100 countries, which account for almost 85% of the world's forests, have promised to stop deforestation by 2030.

Speaking at the conference, Prime Minister of the Socialist Republic of Vietnam Pham Minh Chin made a commitment on behalf of his country to strive to achieve zero greenhouse gas emissions by 2050. The countries are the world's main consumers of coal, the Russian Federation and China have committed to achieving carbon neutrality by 2060, and India, also one of its main consumers, by 2070. In this regard, the intensification of scientific research aimed at the wider use of renewable energy sources, which include hydropower, solar energy, wind energy, geothermal energy, marine tidal energy and the use of biomass, as well as the development and implementation of low-carbon technologies in production processes, especially in industrialized countries. – The main developers of mineral deposits and consumers of fossil fuels, in particular coal and oil, and for this reason the main sources of carbon dioxide, methane and other greenhouse gases, are becoming very important areas of scientific research that can make an important contribution to the process of deflation of greenhouse gas emissions, primarily carbon dioxide into the environment (Figure 1).

Fig. 1. The annual global volume of carbon dioxide emissions into the environment is extremely high

In the context of increasing global environmental pollution caused by industrial emissions, developed countries are actively exploring various strategies to reduce them and are looking for effective ways to bury carbon dioxide in geological layers on land and under the ocean floor.

For example, the technology implemented in Japan for carbon dioxide capture at energy sector enterprises and its subsequent burial in the voids of geological layers formed as a result of the depletion of oil and natural gas deposits, the functioning scheme of which is shown in Figure 2, is one of the modern "green" technologies, the use of which potential will contribute to achieving the goal of carbon neutrality [13]. However, such burial of carbon dioxide in geological layers on land and in the coastal oceanic zone also contains a potential risk of leakage and air pollution as a result of possible fracturing of the layers due to earthquakes and man-made disasters.

Typically, concretes and mortars are made using four main raw materials: cement, aggregates obtained from natural rocks or man-made waste, water, and various additives. At the same time, the production of one cubic meter of concrete, with an annual global output of 9 billion tons, leads to emissions of about 250 kg of carbon dioxide into the environment [14]. Portland cement is the most common binder used for the production of concrete and mortar, and its annual global production is 4 billion tons. However, the production of one ton of Portland cement clinker releases about 0.8 tons of CO_2 into the environment and cement accounts for 8% of the world's annual carbon dioxide emissions [15]. Therefore, measures to reduce carbon dioxide and other greenhouse gas emissions from the production of building materials are important. To achieve this goal, methods such as changing the main ingredients and reducing the cement content in the raw material composition can be used by using finely ground multi-tonnage man-made waste in the form of fuel and metallurgical ashes and slags, as well as waste from the chemical industry, for example,

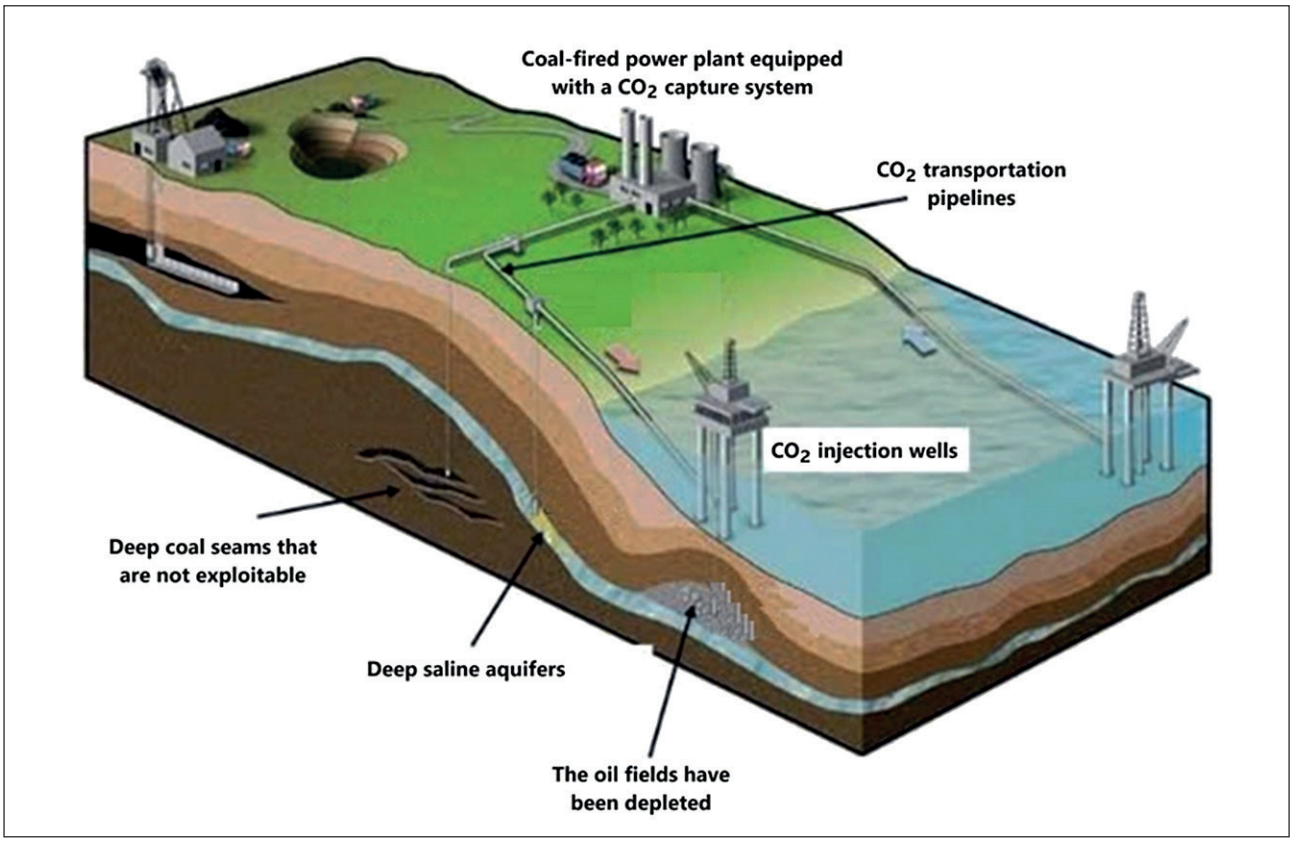


Fig. 2. Burial of carbon dioxide in Japan in the voids of geological layers [13]

electrothermophosphoric slags with a cementing effect, which are usually used as activators of binding properties alkaline solutions.

One example of the search for rational ways to dispose of high-tonnage industrial waste is the research currently being conducted jointly by the National Research University MGSU and the Institute of Building Physics of the Russian Academy of Natural Sciences to develop a technology for the production of exterior wall blocks based on carbonized steel-slag mixtures for civil engineering.

The problem of improving the environment through the rational use of high-tonnage industrial waste is very acute all over the world. For example, in the Russian Federation today, only ash and slag waste from energy complex enterprises, the annual volume of which exceeds 25 million tons, covers an area of more than 20 thousand hectares [16].

According to a report by the Ministry of Industry and Trade of Vietnam, there are currently 33 coal-fired thermal power plants in the country, emitting up to 23–25 million tons of ash and slag per year, which require landfills with a total area of about 1,000 hectares. This negatively affects the environment and causes pollution of marine and river waters. For example, the thermal power plant in the Vung Ang Industrial Park, located in the central part of Vietnam, began operating in 2012 and generates approximately 1 million tons annually. various ash and slag wastes, which, in addition to air pollution, also cause serious pollution of seawater, which in 2016 led to the mass death of fish and marine animals in the coastal waters of the South China Sea [17].

In addition, Vietnam has a significant number of metallurgical plants, such as the Thai Nguyen, Ha Tinh, Phu Mi, Hoa Phat and a number of others, which annually produce large amounts of blast furnace slag that pollute the environment. According to some data [18, 19], Vietnam's metallurgical industry produces about 45–55 million tons of slag every year. Therefore, the use of such slags to produce environmentally friendly "green" geopolymer concrete will help to increase the economic efficiency of production and minimize environmental pollution.

"Green" concrete in the broad semantic meaning of the term is concrete that meets at least one of the three criteria:

1. A variety of industrial and household waste is used to produce it.

2. The process of its manufacture does not harm the environment, since it does not require large expenditures of cement, the production of which requires a lot of energy and is accompanied by emissions of carbon dioxide into the atmosphere.

3. It has high performance and is stable throughout its entire life cycle, which is economically advantageous from the standpoint of durability and the duration of possible maintenance-free operation of concrete and reinforced concrete building products and structures, as well as their subsequent disposal.

In a narrower sense, «green» concretes are understood as low-cement concretes or cement-free binders containing, instead of cement clinker, finely dispersed mineral components with a cementing effect, which were obtained by processing high-tonnage waste from industrial plants or from waste processing of natural raw materials, as well as concretes capable of absorbing carbon dioxide from atmospheric air.

Geopolymer concretes are called environmentally friendly cement-free concretes, which include ashes and slags with pozzolanic or hydraulic activity, and slaked lime and sodium or potassium liquid glass are usually used as binders that have an activating effect on ash and slag.

Although industrial waste (fly ash, fuel and blast furnace slag) is used for the production of certain types of building materials in Vietnam, for example, baked bricks, and is also used in road construction as a leveling layer of the roadway, their use is currently very limited and amounts to only about 5-10 million tons. per year [20–22].

Industrial waste, especially fuel ash and slag, is a very serious cause of environmental problems that cause pollution of soil, water and air in all provinces of Vietnam. At the same time, the level of reuse of man-made waste is very limited and amounts to only about 2–5% of their annual amount [18, 19].

Due to the fact that the economy of the Socialist Republic of Vietnam is currently on the rise and is characterized by high rates of development, as well as due to the fact that the country is undergoing intensive processes of industrialization of the national economy, accompanied by an increase in industrial production, there are many thermal coal-fired power plants and metallurgical plants in Vietnam., As a result of which millions of tons of industrial waste are generated annually, therefore, the problem of recycling high-tonnage man-made waste and exploring the possibility of using them as local secondary raw materials for the production of building materials, including concretes for various purposes, is of great economic, environmental and social importance for Vietnam.

The implementation of these measures in Vietnam will contribute to the implementation of the policy adopted by the Communist Party of Vietnam and the Government of the Socialist Republic of Vietnam towards the development of a closed-loop economy and sustainable "green" transformation of industrial production in the country in order to achieve zero emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases by 2050 and solve the environmental problem of protecting the environment from pollution by high-tonnage man-made waste through their rational and efficient disposal.

To contribute to the achievement of the global goal set by the Paris Climate Agreement, adopted at the end of the climate conference in December 2015, to limit warming on Earth by no more than 1.5 °C by the end of the 21st century compared to pre-industrial levels [23, 24] and to achieve the declared zero level in Vietnam by 2050. The Green Concrete research group of Hanoi Mining and Geological University is conducting research to produce a "green" cement-free concrete material., using for this purpose such high-tonnage waste from various industries in Vietnam as fly ash and slag from thermal power plants, metallurgical slags, mining and processing industry sludge, ceramic waste, lime powder in combination with a special activating solution. The article presents the results of research conducted in this area to solve the problem.

MATERIALS AND METHODS

Materials. The following raw materials were used:

Fly ash (FA) (Figure 3a), collected directly from the chimney of the Green Star incinerator power plant through a bag filter system [25, 26].

Bottom slag (BS) from the same incinerator power plant: before grinding, with porous and uneven grains, after grinding, in the form of a fine powder (Figure 3b).

The physico-mechanical properties and chemical composition of fly ash and finely ground bottom slag of the Green Star incineration power plant are presented in Tables 1 and 2.

Ceramic powder "TOTO (CP) with a particle size of 0.1–0.5 mm (Figure 4), obtained at the Hanoi TOTO Plumbing Products Plant as a result of crushing defective products and industrial waste, the monthly amount of which reaches almost 20 tons, and used as an inert mineral additive for compacting the structure of cement-free concrete.

White lime powder (LP) (Figure 5), which is slaked lime with a $Ca(OH)_2$ content of more than 90%, particle size from a few microns to 0.15 mm, true density of 2.21 g/cm^3 and partially soluble in water (0.185 g/ml).

Dried and sieved slurry waste (SW) from the Tan Rai alumina production plant with a particle size from 0.14 to 2.5 mm (Figure 6).

Coconut fiber (CF), separated from coconut shells during processing, with an average diameter of about 1.5 mm and a length of 15–20 mm, consisting of 70–90% cellulose (Figure 7).

The activating alkaline solution consisted of a mixture of two aqueous solutions: 10 M solution of sodium hydroxide (Figure 8a) and a solution of two and a half aqueous sodium silicate (Figure 8b) manufactured

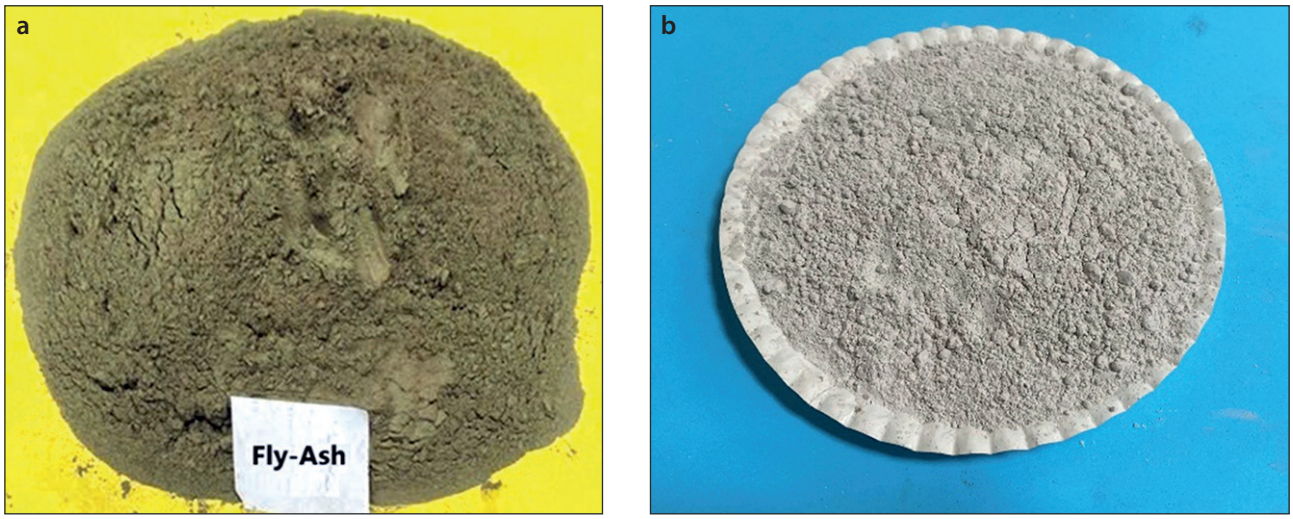


Fig. 3. Fly ash and bottom finely ground slag of the Green Star incineration power plant: a – fly ash; b – finely ground bottom slag

Table 1. Physico-mechanical properties of fly ash and finely ground bottom slag

Indicators	Units of measurement	Test results	
		Fly ash	Finely ground bottom slag
Humidity	% mass.	0.5	4.5
True Density	g/см^3	2.35	2.95
Bulk density	kg/m^3	1570	1485
Specific surface area	cm^2/g	2850	3600
Average grain size	microns	7.15	4.39

Table 2. Chemical composition of fly ash and bottom slag

The content of compounds, % mass.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	TiO_2	Other components	Lost on ignition
Fly ash	28.2	11.5	16.4	3.7	2.4	28.1	2.1	3.1	4.5
Finely ground bottom slag	54.2	23.0	8.5	2.5	2.1	1.5	0.6	3.4	4.2

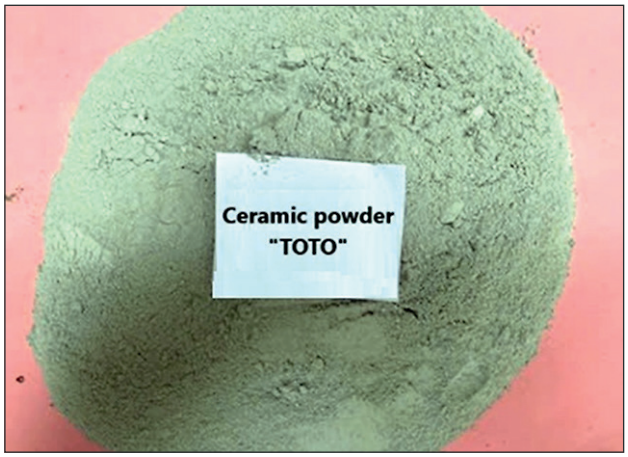


Fig. 4. Ceramic powder "TOTO"

Fig. 5. Lime powder

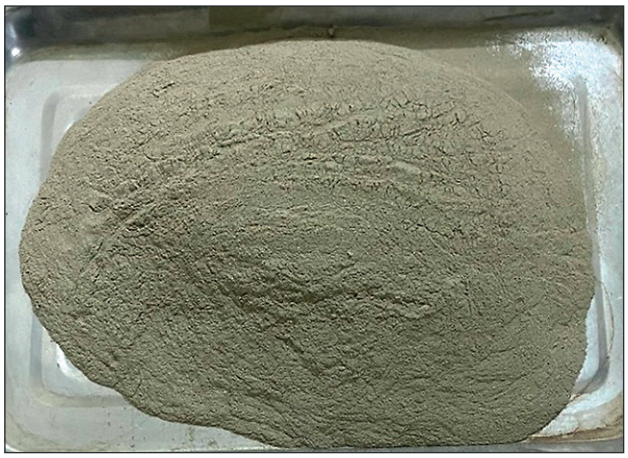


Fig. 6. Slurry waste from alumina production

Fig. 7. Coconut fiber

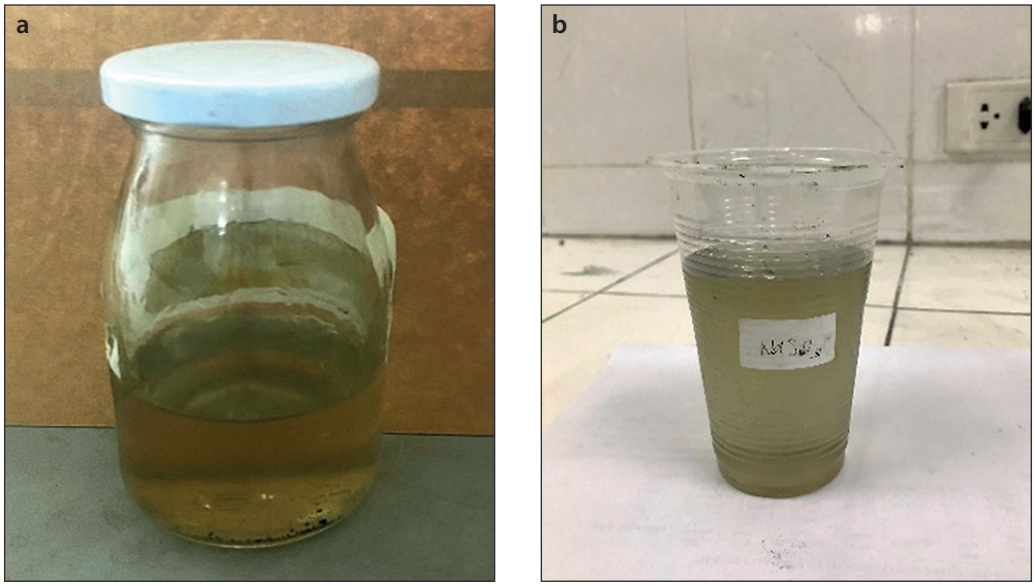


Fig. 8. Activating alkaline solution: a – 10 M sodium hydroxide solution; b – two and a half aqueous sodium silicate solution

by Viet-Nhat with a density of 1.45±0.01 g/cm^3 and 1.55±0.01 g/cm^3, respectively, in the ratio Na_2SiO_3/NaOH = 2.5 [27, 28]. Its percentage composition by weight is NaOH = 12%; Na_2SiO_3 = 30% and water = 58%.

Table 3 shows the chemical composition and physical properties of the sodium silicate solution used.

The sealing water (W) met the requirements of the Vietnamese standard TCVN 4506:2012[1].

Methods. The methodology of the work included:

The absolute volume method was used to determine the composition of the concrete mix for the production of cement-free "green" concrete.

[1] Vietnam Construction Standard TCVN 4506:2012. Water for mixing concrete and mortar. Technical requirements.

Table 3. Chemical composition and physical properties of sodium silicate solution

Chemical formula	$Na_2SiO_3 \cdot 2.5H_2O$
Na_2O	11.8%
SiO_2	29.5%
H_2O	58.7%
Color and appearance	Light yellow gel-like liquid
Color and appearance	1,55 ±0,01 g/cm^3

The experimental studies were conducted in accordance with the current Vietnamese standards:

Fig. 9. Samples-cubes measuring 100×100×100 mm made of developed cement-free "green" concrete

The average density of concrete was deermined on cube samples measuring 100x100x100 mm in accordance with TCVN 3115:2022[2];

The water absorption of concrete samples was determined on cube samples measuring 100×100×100 mm in accordance with TCVN 3113:2022[3] (Figure 9);

The compressive strength of the developed concrete was determined by testing cube samples measuring 100x100x100 mm in accordance with the requirements of TCVN 3118:2022[4] (Figure 10);

– the ability of concrete samples to absorb carbon dioxide was determined by the following method: carbon dioxide from a cylinder was supplied through a flexible hose for 10 minutes to a sealed tank containing concrete samples in the form of multi-hollow bricks (Figure 11).

Fig. 10. Compression testing of concrete samples

The mass of CO_2 absorbed by the concrete sample as a result of its forced carbonation was calculated using the formula:

$$m_{CO_2} = m_2 - m_1,$$

where: m_1 – is the mass of the concrete sample before carbonation, g; m_2 – is the mass of the concrete sample after carbonation is completed, g.

RESULTS

The composition of the concrete mix for the production of cement-free "green" concrete is shown in Table 4.

To assess the ability of the concrete of the developed composition to absorb carbon dioxide, concrete samples with dimensions of 220×110×60 mm were used, corresponding to the dimensions of the standard concrete brick used in Vietnam.5

The following test results were obtained:

– the average density of developed concrete at the age of 28 days is 1950 kg/m^3 (Figure 12);
– the compressive strength of the developed concrete at the age of 28 days is 7.5–11.5 MPa;
– water absorption by weight is 8–10% by weight;
– the mass of one sample brick of developed "green" concrete measuring 220×110×60 mm with six cylindrical voids is 1.5–2.2 kg.

An important feature is the ability of concrete bricks of the developed composition to absorb carbon dioxide during hardening due to the presence of slaked lime in their composition. According to the results obtained, each such brick sample measuring 220×110×60 mm with

[2] Vietnam Construction Standard TCVN 3115:2022. Hardened concrete. Density determination method

[3] Vietnam Construction Standard TCVN 3113:2022. Hardened concrete. Method for determining water absorption

[4] Vietnam Construction Standard TCVN 3118:2022. Hardened concrete. Method for determining compressive strength

Fig. 11. Carbonation of samples of developed concrete during their hardening

Table 4. The composition of 1 m³ of concrete mix for the production of cement-free "green" concrete

Raw materials	FA	BS	CP	LP	SW	CF	NaOH	$Na_2SiO_3 \cdot 2.5H_2O$	W	LOI
Weight, kg	360	280	100	100	250	50	160	518	150	1968

Fig. 12. Determination of the average density of developed concrete at the age of 28 days

six voids has the ability to absorb about 15–20 g of CO_2 (Figure 13).

In addition, about 1.5 kg of industrial waste is used in the manufacture of one such sample and absolutely no natural materials are used. Thus, as a result of obtaining 1 m³ of concrete of the developed composition, about 1.1 tons of high-tonnage industrial waste can be disposed of in the form of fly ash and bottom slags from thermal power plants, metallurgical slags, powdered ceramic waste, as well as sludge from mining and processing enterprises. Therefore, the implementation of the results of this study will contribute to the development of a sustainable "green" economy in Vietnam and minimize the risk of environmental pollution from greenhouse gas emissions and high-tonnage industrial waste.

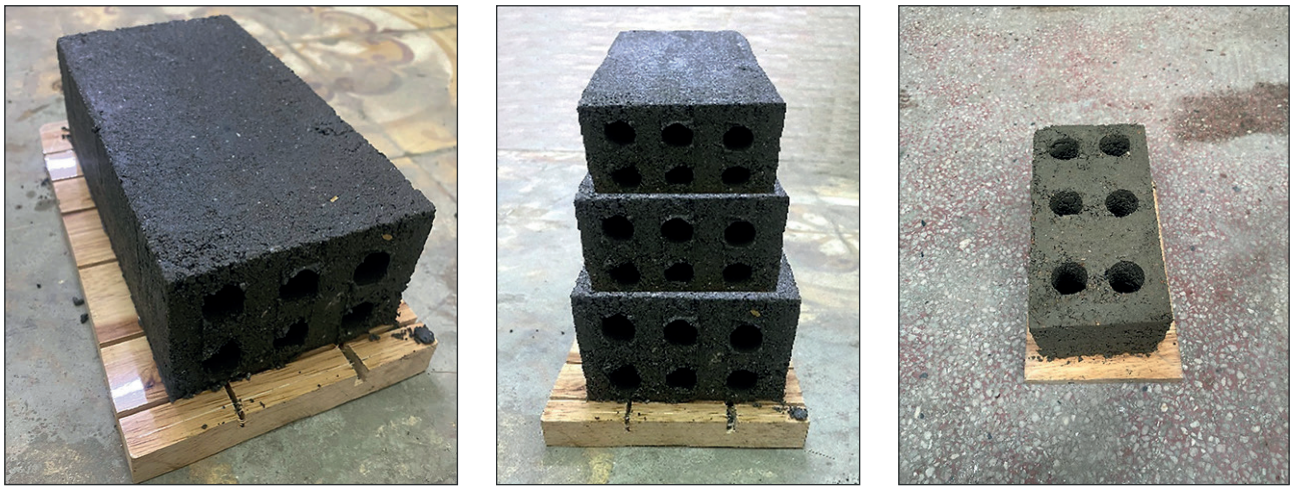


Fig. 13. Samples of developed concrete in the form of standard-sized bricks with cavities capable of absorbing carbon dioxide

The main advantages of the developed cement-free concrete, capable of absorbing carbon dioxide, include:

– Reduction of greenhouse gas emissions: it is estimated that each 1 m^3 of developed concrete is capable of absorbing about 10–13 kg of CO_2 emissions, thereby improving air quality;
– conservation of natural resources through the use of high-tonnage industrial waste and the abandonment of the use of Portland cement, the production of which requires natural raw materials and which is accompanied by significant carbon dioxide emissions;
– realization of the possibility of protecting the environment from pollution by high-tonnage industrial waste as a result of their use as the main raw material for the production of developed "green" concrete, which contributes to the development of a closed-cycle economy.

CONCLUSION

As a result of the analysis of the current state and future prospects for the development of low-carbon construction materials in Vietnam, the following conclusions can be drawn:

1. The Green Concrete Research Group of Hanoi Mining and Geological University hopes that the results of the research conducted aimed at involving high-tonnage industrial waste in the production of building materials in Vietnam can become a breakthrough solution for obtaining materials with a low carbon footprint, with the required performance properties, high consumer value and low cost. The production of such materials will contribute to the conservation of non-renewable natural resources and will have a beneficial effect in the field of environmental protection from pollution, since obtaining 1 m^3 of cement-free "green" concrete will allow the disposal of about 1.1 tons of high-tonnage industrial waste. Thus, the results of the conducted research will contribute to the implementation in Vietnam of the planned policy course for the "green" transformation of the economy into a sustainable closed-loop economy.

2. It has been established that 1 m3 of developed cement-free "green" concrete has the ability to absorb 10–13 kg of carbon dioxide. This will contribute to achieving the stated goal of achieving zero greenhouse gas emissions in Vietnam by 2050, as promised by the Prime Minister of the Socialist Republic of Vietnam at the 26th UN Climate Change Conference.

3. However, there are currently a large number of obstacles preventing the introduction of environmentally friendly, low-carbon footprint building materials into real construction projects in Vietnam. Their elimination requires further more comprehensive scientific research.

REFERENCES

1. Lyapidevskaya O.B. Economic and environmental efficiency of low-carbon building materials. *Almanac of Crimea*. 2022; 34:13-20. – EDN: MLDAMQ.

2. Skobelev D.O., Fedoseev S.V. The policy of increasing resource efficiency and forming a closed-loop economy. *Competence*. 2021;3:5-13. https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-3-05-14

3. Omar W.M.S. A hybrid life cycle assessment of embodied energy and carbon emissions from conventional and industrialised building systems in Malaysia. *Energy Build*. 2018;167:253-268. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.045

4. Neupane K. High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges. *Advances in Materials*. 2018;7(2):15-25. https://doi.org/10.11648/j.am.20180702.11.

5. Oluwole Akadiri P. Investigating factors influencing building materials selection in Nigerian construction industry. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2018;6(4):154-157. https://doi.org/10.12691/ajcea-6-4-4

6. Zhang S., Xiang X., Ma Z., Ma M., Zou C. Carbon neutral roadmap of commercial building operations by mid-century: Lessons from China. *Buildings*. 2021;11(11):510. https://doi.org/10.3390/buildings11110510

7. Venkatarama Reddy, B.V. Sustainable materials for low carbon buildings. *Int. J. Low Carbon Technol.* 2009; 4:175–181. http://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025

8. Cabeza L.F., Rincón L., Vilariño V., Pérez G., Castell A. Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:394–416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037

9. Zhang, N., Yu K., Chen Z. How does urbanization affect carbon dioxide emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy, Elsevier*. 2017;107(C):678–687. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.072

10. Arup & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). *Material Choice for Green Buildings*; 2012. Available online: https://docs.wbcsd.org/2012/01/WBCSD_Material_choice_for_green_buildings.pdf (accessed: 25.10.2021).

11. Ahmed Ali K., Ahmad M.I., Yusup Y. Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*. 2020; 12(18):7427. http://doi.org/10.3390/su12187427

12. Chan. M., Masrom M.A.N., Yasin S.S. Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives. *Buildings*. 2022; 12(4):486. https://doi.org/10.3390/buildings12040486

13. Phung Quoc Hai. The CO_2 capture and storage project in Japan and its potential application in Vietnam. Asia-Pacific Energy Research Center (APERC). September 2023. Available online: https://nangluongvietnam.vn/du-an-thu-giu-luu-tru-co2-tomakomai-nhat-ban-va-tiem-nang-ap-dung-tai-viet-nam-31523.html. (In Viet). (accessed: 25.10.2021).

14. Khozin V., Khokhryakov O., Nizamov R. A «carbon footprint» of low water demand cements and cement-based concrete. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;890(1):012105. https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012105

15. Andrew R.M. (2018). Global CO_2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018;10(1):195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018

16. Goncharova M.A., Matchenko N.A. Development of geopolymer concrete compositions for structural material. *Scientific research: from theory to practice: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*.2015;2:4(5):15–18. (In Russ.).

17. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Effect of Complex Organo-Mineral Modifier on the Properties of Corrosion-Resistant Concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251 (01005). https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101005

18. Van Lam Tang, Trong Chuc Nguyen, Xuan Hung Ngo, Van Phi Dang, Boris Bulgakov, Sophia Bazhenova. Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages. *MATEC Web of Conferences*. 2018;193(03024). https://doi.org/10.1051/matecconf/201819303024

19. Van Lam Tang, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Sophia Bazhenova. Combined Effect of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light - Weight Concrete Properties. *MATEC Web of Conferences* 2018;251(01007). https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101007

21. Pham Chi Cuong. The use of waste from the metallurgical industry in Vietna. *Journal of Science of Vietnam*. 2012;6(10):52-54.

22. Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Bulgakov B. I., Alexandrova O.V., Larsen O.A., Orekhova A.Yu., Tyurina A.A. The use of ash and slag waste as an additional cementing material. *Scientific and theoretical journal "Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov"*. 2018;08:19-27. https://doi.org/10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511 (In Russ.)

22. Dang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V., Larsen O.A. The possibility of using ash residues for the production of construction materials in Vietnam. *Scientific and theoretical journal "Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov"*. 2017; 06:06-12. https://doi.org/10.12737/article_5926a059214ca0.89600468 (In Russ.).

23. Huynh Nguyen Duc, Phuong Le Thi. Implications and changes of world's battle against climate change after the US withdrew from Paris Agreement. *Petrovietnam Journal*. 2017;09:57-62. https://doi.org/10.25073/petrovietnam-journal.v9i0.204 (In Viet).

24. 7th International Conference of Asian Concrete Federation. Hanoi. Vietnam. October 2016. Available online: https://moc.gov.vn/tl/tin-tuc/7716/hoi-nghi-quoc-te-lan-thu-7-cua-lien-doan-be-tong-chau-a.aspx (In Viet). (accessed: 25.10.2021).

25. Tan Van Lam, Wu Kim Dien. The possibility of using metallurgical industry waste in the production of building materials. *Journal of Science and Technology, Ministry of Industry and Trade*. 2020;43:12-17. (In Viet).

26. Lam T.V., Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Anh P.N. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:1-10. https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032007

27. Tang V.L., Ngo X.H., Wu K.Z., Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Alexandrova O.V. Geopolymer concrete using high-tonnage man-made waste. *Construction: science and education*. 2021;11(2):1-10. https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.2.2 (In Russ.).

28. Tang V.L., Bulgakov B.I. The possibility of using ash-slag waste and rice husk ash on geopolymer concrete for the construction of building in Vietnam. *BDU Journal of Science & Technology*. 2021;03(01):26-39. (In Viet).

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lam V. Tang – PhD, Research Lecturer, Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), Hanoi, Vietnam, tangvanlam@humg.edu.vn, https://orcid.org/0000-0002-4857-835X

Dung T. Nguyen – PhD, Research Lecturer, Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), Hanoi, Vietnam, nguyentrongdung@humg.edu.vn, https://orcid.org/0000-0002-8515-8469

Boris I. Bulgakov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, BulgakovBI@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4737-8524

Olga V. Aleksandrova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, AleksandrovaOV@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1791-8515

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Lam V. Tang – research concept, validation, formal analysis, resources, supervision, project administration, fundraising.

Dung T. Nguyen – research concept, software, research, writing source text.

Boris I. Bulgakov – methodology, verification, data processing, review and editing, project administration.

Olga V. Aleksandrova – methodology, validation, visualization, project administration.

The authors declare no conflict of interests.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 08.02.2025; accepted for publication 12.02.2025.

SYSTEM SOLUTIONS FOR TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Научная статья / Original article
УДК 666.97
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94

CC BY 4.0

Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов

Лам Ван Танг[1], Зунг Чонг Нгуен[1], Борис Игоревич Булгаков[2], Ольга Владимировна Александрова[2]*

[1] Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается возможность производства во Вьетнаме строительных материалов на основе техногенных отходов, обладающих низким углеродным следом и способных поглощать углекислый газ, для достижения к 2050 году нулевого выброса парниковых газов. До настоящего времени поискам решения этой проблемы уделялось недостаточное внимание. **Методы и материалы.** Были проведены исследования с целью оценки возможности получения «зеленого» бесцементного бетонного материала, используя для этого местные промышленные отходы и отходы переработки продукции сельского хозяйства в виде золы-уноса и донного шлака мусоросжигательной электростанции «Green Star», шламовых отходов производства глинозема, керамических отходов, известкового порошка и кокосового волокна в сочетании со специальным активирующим щелочным раствором. Среднюю плотность, прочность на сжатие и водопоглощение разработанного бесцементного бетона определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в соответствии с требованиями действующих вьетнамских стандартов. Способность полученного бетона поглощать углекислый газ оценивали с помощью разработанного метода путем измерения массы углекислого газа, поглощенного бетонными образцами. **Результаты и обсуждение.** Средняя плотность разработанного бетона составляет 1950 кг/м^3; прочность на сжатие в возрасте 28 суток – 7,5÷11,5 МПа; водопоглощение – 8÷10% масс. К основным достоинствам применения бесцементного бетона разработанного состава относятся снижение углеродного следа благодаря отказу от использования портландцемента, способность бетона поглощать углекислый газ и возможность утилизации многотоннажных техногенных отходов при его изготовлении. **Заключение.** Результаты проведенных исследований показывают, что использование разработанного бесцементного «зеленого» бетона для изготовления строительных изделий и конструкций во Вьетнаме позволит утилизовать порядка 1,1 т многотоннажных промышленных отходов в расчете на 1 кубический метр и в ходе эксплуатации поглотить 10–13 кг углекислого газа. Это будет способствовать реализации намеченного курса на «зеленую» трансформацию экономики Вьетнама в устойчивую экономику замкнутого цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защита окружающей среды, многотоннажные промышленные отходы, выброс парниковых газов, снижение углеродного следа, «зеленые» бесцементные строительные материалы, зола-унос, тонкомолотый донный шлак, шламовые отходы производства глинозема, порошкообразные керамические отходы, известковый порошок, кокосовое волокно, активирующий щелочной раствор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Танг В.Л., Нгуен Ч.З., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):83–94. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94. – EDN: WQGUWO.

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Научная статья / Original article
УДК 666.97
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94

CC BY 4.0

Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов

Лам Ван Танг[1], Зунг Чонг Нгуен[1], Борис Игоревич Булгаков[2], Ольга Владимировна Александрова[2]*

[1] Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается возможность производства во Вьетнаме строительных материалов на основе техногенных отходов, обладающих низким углеродным следом и способных поглощать углекислый газ, для достижения к 2050 году нулевого выброса парниковых газов. До настоящего времени поискам решения этой проблемы уделялось недостаточное внимание. **Методы и материалы.** Были проведены исследования с целью оценки возможности получения «зеленого» бесцементного бетонного материала, используя для этого местные промышленные отходы и отходы переработки продукции сельского хозяйства в виде золы-уноса и донного шлака мусоросжигательной электростанции «Green Star», шламовых отходов производства глинозема, керамических отходов, известкового порошка и кокосового волокна в сочетании со специальным активирующим щелочным раствором. Среднюю плотность, прочность на сжатие и водопоглощение разработанного бесцементного бетона определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в соответствии с требованиями действующих вьетнамских стандартов. Способность полученного бетона поглощать углекислый газ оценивали с помощью разработанного метода путем измерения массы углекислого газа, поглощенного бетонными образцами. **Результаты и обсуждение.** Средняя плотность разработанного бетона составляет 1950 кг/м^3; прочность на сжатие в возрасте 28 суток – 7,5÷11,5 МПа; водопоглощение – 8÷10% масс. К основным достоинствам применения бесцементного бетона разработанного состава относятся снижение углеродного следа благодаря отказу от использования портландцемента, способность бетона поглощать углекислый газ и возможность утилизации многотоннажных техногенных отходов при его изготовлении. **Заключение.** Результаты проведенных исследований показывают, что использование разработанного бесцементного «зеленого» бетона для изготовления строительных изделий и конструкций во Вьетнаме позволит утилизовать порядка 1,1 т многотоннажных промышленных отходов в расчете на 1 кубический метр и в ходе эксплуатации поглотить 10–13 кг углекислого газа. Это будет способствовать реализации намеченного курса на «зеленую» трансформацию экономики Вьетнама в устойчивую экономику замкнутого цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защита окружающей среды, многотоннажные промышленные отходы, выброс парниковых газов, снижение углеродного следа, «зеленые» бесцементные строительные материалы, зола-унос, тонкомолотый донный шлак, шламовые отходы производства глинозема, порошкообразные керамические отходы, известковый порошок, кокосовое волокно, активирующий щелочной раствор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Танг В.Л., Нгуен Ч.З., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(1):83–94. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94. – EDN: WQGUWO.

Low carbon footprint building materials using industrial waste

Lam V. Tang[1], Dung T. Nguyen[1], Boris I. Bulgakov[2], Olga V. Aleksandrova[2]*

[1] Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), Hanoi, Vietnam
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

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

© Танг В.Л., Нгуен Ч.З., Булгаков Б.И., Александрова О.В., 2025

ABSTRACT

Introduction. The possibility of producing construction materials in Vietnam based on man-made waste with a low carbon footprint and capable of absorbing carbon dioxide is being considered in order to achieve zero greenhouse gas emissions by 2050. To date, insufficient attention has been paid to the search for a solution to this problem. **Methods and materials.** Studies were conducted to assess the possibility of obtaining a "green" cement-free concrete material using local industrial and agricultural waste in the form of fly ash and bottom slag from the Green Star incineration plant, alumina sludge, ceramic waste, lime powder and coconut fiber combined with a special activating agent. an alkaline solution. The average density, compressive strength, and water absorption of the developed cement-free concrete were determined on cube samples measuring 100×100×100 mm in accordance with the requirements of current Vietnamese standards. The ability of the resulting concrete to absorb carbon dioxide was evaluated using the developed method by measuring the mass of carbon dioxide absorbed by concrete samples. Results and discussion. The average density of the developed concrete is 1950 kg/m^3; compressive strength at the age of 28 days is 7.5–11.5 MPa; water absorption is 8–10% by weight. The main advantages of using cement-free concrete of the developed composition include reducing the carbon footprint due to the abandonment of the use of Portland cement, the ability of concrete to absorb carbon dioxide and the possibility of recycling high-tonnage man-made waste during its manufacture. **Conclusion.** The results of the conducted research show that the use of the developed cement-free "green" concrete for the manufacture of building products and structures in Vietnam will allow to recycle about 1.1 tons. high-tonnage industrial waste per 1 cubic meter and absorb 10–13 kg of carbon dioxide during operation. This will contribute to the implementation of the planned course for the "green" transformation of Vietnam's economy into a sustainable closed-loop economy.

KEYWORDS: environmental protection, high-tonnage industrial waste, greenhouse gas emissions, carbon footprint reduction, "green" cement-free building materials, fly ash, finely ground bottom slag, slurry waste from alumina production, powdered ceramic waste, lime powder, coconut fiber, activating alkaline solution

FOR CITATION:
Tang V.L., Nguyen T.D., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Low carbon footprint building materials using industrial waste. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(1):83–94. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-1-83-94. – EDN: WQGUWO.

ВВЕДЕНИЕ

По мере того, как актуальные экологические проблемы нашей планеты становятся все более глобальными и требующими незамедлительного поиска их рациональных решений, строительная отрасль, характеризующаяся высоким уровнем загрязнения окружающей среды производственными отходами и значительными выбросами в атмосферу парниковых газов и, в первую очередь CO_2, постепенно переходит к использованию **экологически чистых строительных материалов** и эффективных строительных технологий, обладающих низким углеродным следом. Комплекс эффективных и экономически обоснованных принимаемых мер позволит предотвратить дальнейшее истончение озонового слоя, сократить выбросы парниковых газов и стабизировать их концентрацию в атмосфере [1–10].

Строительный сектор является крупнейшим мировым потребителем сырьевых ресурсов, а эксплуатация зданий и сооружений различного назначения характеризуется наибольшим потреблением энергии в мире. Это позволило сложиться и существовать устойчивому мнению, что одним из ведущих видов человеческой деятельности, приводящим к глобальному потеплению и вызывающим резкое изменение климата на нашей планете, является наблюдаемый в настоящее время высокий мировой темп строительства [11, 12].

Сокращение выбросов парниковых газов (углекислого газа, метана, оксидов азота и др.) в настоящее время является серьезной глобальной мировой проблемой, требующей эффективных поисков ее решения во всех индустриально развитых странах, в том числе в Российской Федерации и во Вьетнаме.

На 26-ой Конференции ООН по вопросам изменения климата, проходившей с 31 октября по 12 ноября 2021 года в Глазго (Великобритания) с участием 25 тыс. делегатов из 200 стран, в том числе около 120 глав государств, состоялось обсуждение следующих трех наиболее важных и актуальных проблем, стоящих перед мировым сообществом:

1. Сокращение выбросов метана – одного из самых вредоносных парниковых газов, который в значительной мере способствует потеплению климата. В результате обсуждения более 100 мировых лидеров подписали соглашение о сокращении выбросов метана к 2030 году до 30%.

2. Постепенный отказ от использования угля в течение 40-х годов XXI века, поскольку он является самым «грязным» источником ископаемого топлива, в результате сжигания которого образуется и выбрасывается в атмосферу большое количество парниковых газов и, в первую очередь, углекислого газа. Полностью отказаться от угольной энергетики в указанные сроки приняли на себя обязательства более 40 стран, в том числе Канада, Польша, Украина, Республика Корея, Индонезия и Вьетнам.

3. Сохранение лесов на нашей планете, так как именно леса играют критически важную роль в углеродном цикле, поглощая углекислый газ из атмосферы. Лидеры более 100 стран, на долю которых приходится почти 85% мировых лесов, пообещали остановить их вырубку к 2030 году.

Выступая на конференции, премьер-министр Социалистической Республики Вьетнам Фам Минь Чинь взял от имени своей страны обязательство стремиться достичь нулевых выбросов парниковых газов к 2050 году. Страны–главные мировые потребители угля, Российская Федерация и Китай обязались достичь уровень углеродной нейтральности к 2060 году, а Индия, тоже один из основных его потребителей, – к 2070 году. В связи с этим интенсификация научных исследований, направленных на более широкое использование возобновляемых источников энергии, к которым относятся гидроэнергия, солнечная энергия, энергия ветра, геотермальная энергия, энергия морских приливов и отливов и использование биомассы, а также разработка и внедрение в производственные процессы технологий с низким углеродным следом, особенно в промышленно развитых странах – главных разработчиках месторождений полезных ископаемых и потребителях ископаемого топлива, в частности угля и нефти, и являющихся по этой причине основными источниками выбросов углекислого газа, метана и других парниковых газов, становятся весьма важными направлениями научных исследований, способными внести важный вклад в процесс дефляции выброса парниковых газов и, в первую очередь, углекислого газа в окружающую среду (рис. 1).

В условиях усиливающегося во всем мире загрязнения окружающей среды, вызванного промышленными выбросами, развитые страны активно изучают различные стратегии их сокращения и ищут эффективные способы захоронения углекилого газа в геологических слоях на суше и под океанским дном.

Рис. 1. Ежегодный мировой объем выбросов углекислого газа в окружающую среду чрезвычайно велик

Например, реализуемая в Японии технология улавливания углекислого газа на предприятиях энергетического сектора и его последующего захоронения в пустотах геологических слоев, образовавшихся в результате исчерпания месторождений нефти и природного газа, схема функционирования которой изображена на рис. 2, является одной из современных «зеленых» технологий, использование потенциала которых будет способствовать достижению цели углеродной нейтральности [13]. Однако подобное захоронение углекислого газа в геологических слоях на суше и в прибрежной океанической зоне также содержит потенциальную опасность его утечки и загрязнения воздушной среды в результате возможного разлома слоев из-за землетрясений и техногенных катастроф.

Обычно бетоны и строительные растворы изготавливают с использованием четырех основных сырьевых материалов: цемента, заполнителей, полученных из природных горных пород или техногенных отходов, воды и различных добавок. При этом производство одного кубометра бетона, ежегодный мировой выпуск которого составляет 9 млрд т, приводит к выбросам в окружающую среду около 250 кг углекислого газа [14]. Портландцемент является наиболее распространенным связующим веществом, используемым для получения бетонов и строительных растворов, и его ежегодное мировое производство составляет 4 млрд т, в том числе во Вьетнаме 99 млн т. Но при этом при производстве одной тонны портландцементного клинкера в окружающую среду выбрасывается около 0,8 т CO_2 и на долю цемента приходится 8% ежегодных мировых выбросов углекислого газа [15]. Поэтому меры по снижению выбросов углекислого и других парниковых газов при производстве строительных материалов имеют важное значение. Для достижения этой цели могут быть использованы такие методы, как изменение основных ингредиентов и снижение содержания цемента в сырьевой композиции путем использования тонкоизмельченных многотоннажных техногенных отходов в виде топливных и металлургических зол и шлаков, а также отходов химической промышленности, например, электротермофосфорных шлаков, обладающих цементирующим действием, в качестве активаторов вяжущих свойств которых, как правило, применяют щелочные растворы.

В качестве одного из примеров поиска рациональных путей утилизации многотоннажных промышленных отходов можно привести проводимые в настоящее время совместно НИУ МГСУ и Институтом строительной физики РААСН исследования с целью разработки технологии производства наружных стеновых блоков на основе карбонизи-

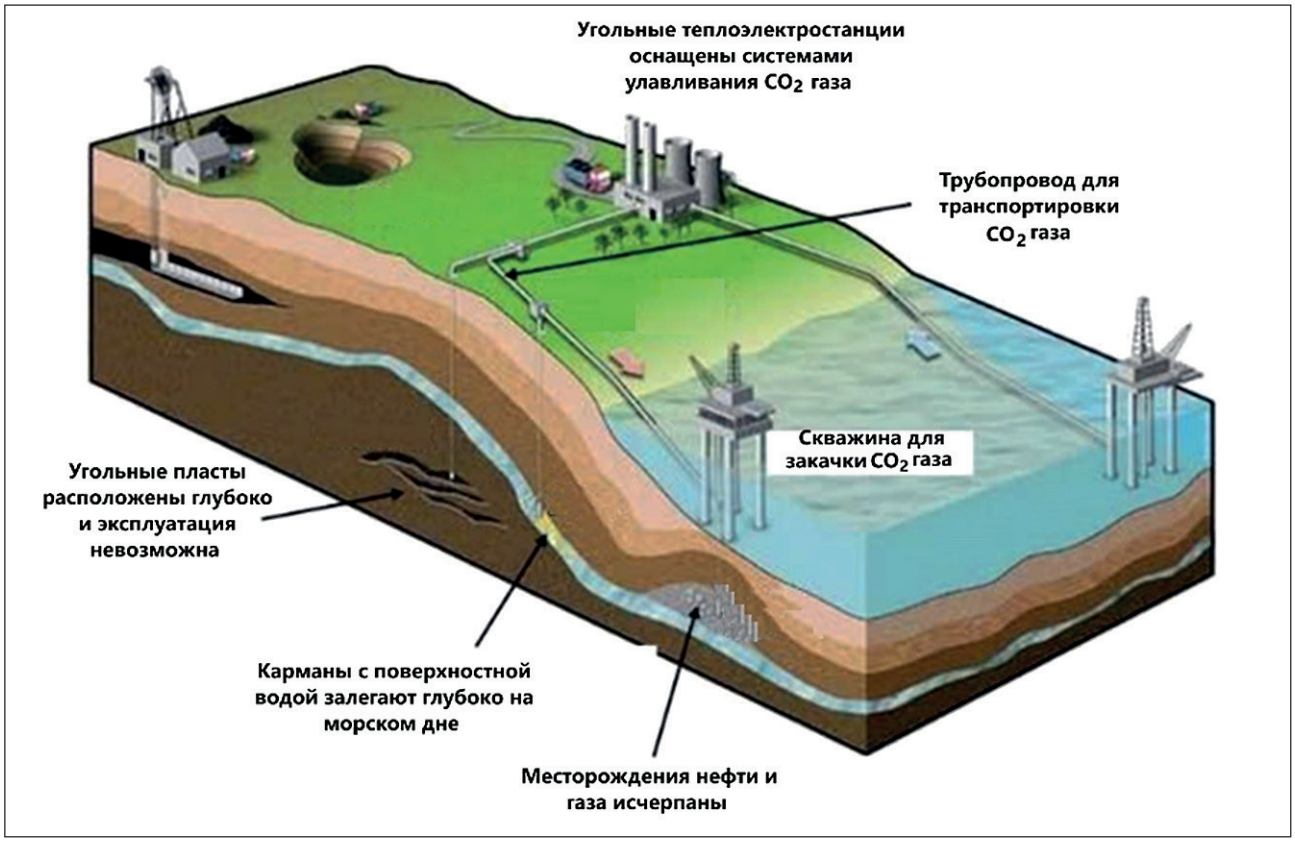


Рис. 2. Захоронение углекислого газа в Японии в пустотах геологических слоев [13]

рованных сталешлаковых смесей для гражданского строительства.

Проблема улучшения экологии путем рационального использования многотоннажных промышленных отходов стоит весьма остро во всем мире. Например, в Российской Федерации на сегодняшний день одни лишь золошлаковые отходы предприятий энергетического комплекса, ежегодный объем которых превышает 25 млн т, занимают площадь более 20 тыс. гектаров [16].

Согласно отчету Министерства промышленности и торговли Вьетнама, в настоящее время в стране действуют 33 угольных теплоэлектростанции, выбрасывающих до 23÷25 млн т золы и шлака в год, для захоронения которых требуются свалки общей площадью порядка 1000 гектаров. Это отрицательно влияет на окружающую среду и вызывет загрязнение морских и речных вод. Например, тепловая электростанция в индустриальном парке «Вунг Анг», расположенная в центральной части Вьетнама, начала свою работу в 2012 году и ежегодно она образует примерно 1 млн т различных золошлаковых отходов, которые помимо загрязнения воздуха вызывают также серьезное загрязнение морской воды, приведшее в 2016 году к массовой гибели рыбы и морских животных в прибрежных водах Южно-Китайского моря [17].

Кроме того, во Вьетнаме действует значительное количество металлургических заводов, таких как металлургические заводы «Тхай Нгуен», «Ха Тинь», «Фу Ми», «Хоа Фат» и ряд других, в результате работы которых ежегодно образуется большое количество доменных шлаков, загрязняющих окружающую среду. По некоторым данным [18,19], каждый год металлургическая промышленность Вьетнама производит около 45÷55 млн т шлаков. Поэтому использование таких шлаков для получения экологически чистого «зеленого» геополимерного бетона будет способствовать повышению экономической эффективности производства и минимизирует загрязнение окружающей среды.

«Зеленый» бетон в широком смысловом значении этого термина – это бетон, который удовлетворяет хотя бы одному из трех критериев:

1. Для его получения используются разнообразные как промышленные, так и бытовые отходы.

2. Процесс его изготовления не наносит вред окружающей среде, поскольку не требует больших расходов цемента, производство которого требует много энергии и сопровождается выбросами в атмосферу углекислого газа.

3. Имеет высокие эксплуатационные показатели и обладает устойчивостью в течение всего его жиз-

ненного цикла, что экономически выгодно с позиций долговечности и продолжительности возможных сроков безремонтной эксплуатации бетонных и железобетонных строительных изделий и конструкций, а также их последующей утилизации.

В более узком смысле под «зелеными» бетонами понимаются малоцементные бетоны или бетоны на бесцементных вяжущих, содержащих вместо цементного клинкера тонкодисперсные минеральные компоненты, обладающие цементирующим действием, которые были получены путем переработки многотоннажных отходов промышленных производств или из отходов обработки природного сырья, а также бетоны, способные поглощать углекислый газ из атмосферного воздуха.

Геополимерными бетонами называют экологически чистые бесцементные бетоны, в состав которых входят золы и шлаки, обладающие пуццоланической или гидравлической активностью, а в качестве вяжущих веществ, оказывающих активирующее действие на золу и шлак, обычно используют гашеную известь и натриевое или калиевое жидкое стекло.

Хотя промышленные отходы (зола-уноса, топливный и доменный шлаки) и находят применение для производства некоторых видов строительных материалов во Вьетнаме, например, обожженного кирпича, а также используются при строительстве дорог в качестве выравнивающего слоя дорожного полотна, но в настоящее время их использование весьма ограничено и составляет только около 5÷10 млн т в год [20–22].

Промышленные отходы и, в первую очередь, топливные золы и шлаки являются очень серьезной причиной возникновения проблем экологического характера, вызывающих загрязнение почвы, воды и воздуха окружающей среды во всех провинциях Вьетнама. При этом уровень повторного использования техногенных отходов весьма ограничен и составляет всего около 2–5% от их ежегодного количества [18, 19].

В связи с тем, что экономика Социалистической Республики Вьетнам в настоящее время находится на подъеме и характеризуется высокими темпами развития, а также из-за того, что в стране идут интенсивные процессы индустриализации народного хозяйства, сопровождаемые ростом промышленного производства, во Вьетнаме действует много тепловых угольных электростанций и металлургических заводов, в результате работы которых ежегодно образуются миллионы тонн промышленных отходов. Поэтому проблема утилизации многотоннажных техногенных отходов и изучения возможности их использования в качестве местного вторичного сырья для производства строительных материалов, в том числе бетонов различного назначения, имеет для Вьетнама важное экономическое, экологическое и социальное значение.

Реализация во Вьетнаме комплекса указанных мероприятий будет способствовать воплощению в жизнь взятому Коммунистической партией Вьетнама и Правительством Социалистической Республики Вьетнам курсу на развитие в стране экономики замкнутого цикла и устойчивую «зеленую» трансформацию промышленного производства с целью достижения нулевого уровня выбросов углекислого и других парниковых газов к 2050 году и решению экологической проблемы защиты окружающей среды от загрязнения многотоннажными техногенными отходами путем их рациональной и эффективной утилизации.

Для внесения своего вклада в достижение установленной Парижским соглашением по климату, принятому по итогам климатической конференции в декабре 2015 года, общемировой цели по ограничению потепления на Земле до конца XXI века не более чем на 1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем [23, 24] и достижения к 2050 году во Вьетнаме заявленного уровня нулевого выброса парниковых газов научная группа «Зеленый бетон» Ханойского горно-геологического университета проводит исследования с целью получения «зеленого» бесцементного бетонного материала, используя для этого такие многотоннажные отходы различных производств во Вьетнаме, как зола-унос и шлаки теплоэлектростанций, металлургические шлаки, шламы горнодобывающей и обрабатывающей промышленности, керамические отходы, известковый порошок в сочетании со специальным активирующим раствором. В статье приведены полученные результаты проведенных исследований в данной области для решения поставленной задачи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. Были использованы следующие сырьевые материалы.

Зола-унос (ЗУ) (рис. 3а), собираемая непосредственно из дымохода мусоросжигательной электростанции «Green Star» через систему рукавных фильтров [25, 26].

Донный шлак (ДШ) той же мусоросжигательной электростанции: до помола – с пористыми и неравномерными по размеру зернами, после помола – в виде тонкодисперсного порошка (рис. 3б).

Физико-механические свойства и химический состав золы-уноса и тонкомолотого донного шлака мусоросжигательной электростанции «Green Star» представлены в табл. 1 и 2.

Керамический порошок «ТОТО» (КП) с размером частиц 0,1÷0,5 мм (рис. 4), получаемый на Ханой-

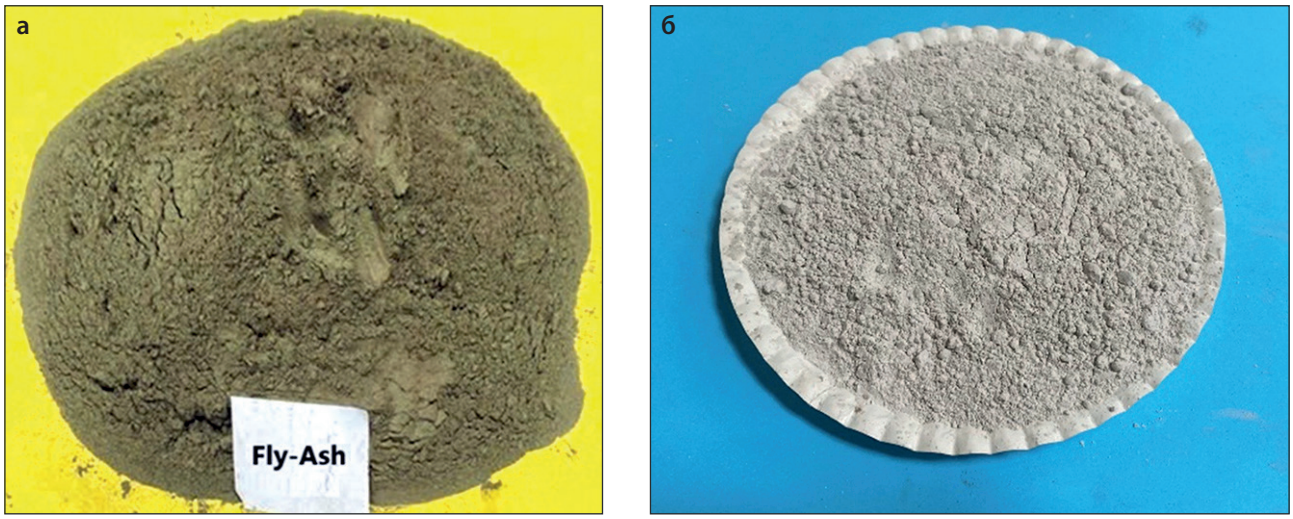


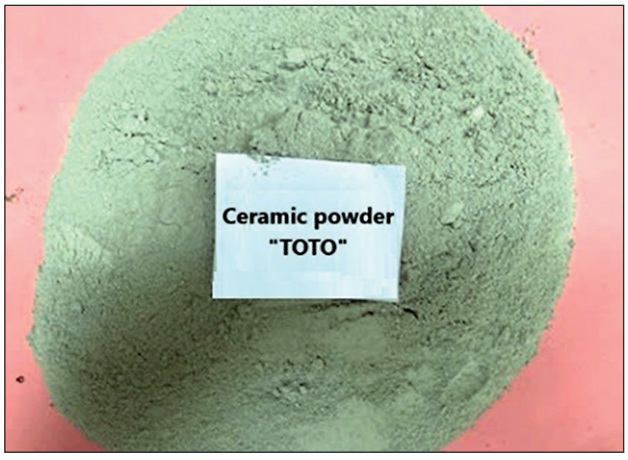
Рис. 3. Зола-унос и донный тонкомолотый шлак мусоросжигательной электростанции «Green Star»:
а – зола -унос; б – тонкомолотый донный шлак

Таблица 1. Физико-механические свойства золы-уноса и тонкомолотого донного шлака

Показатели	Единицы измерения	Результаты испытаний	
		Зола-унос	Тонкомолотый донный шлак
Влажность плотность	% масс.	0,5	4,5
Истинная плотность	г/см^3	2,35	2,95
Насыпная плотность	кг/м^3	1570	1485
Удельная поверхность	см^2/г	2850	3600
Средний размер частиц	мкм	7,15	4,39

Таблица 2. Химический состав золы-уноса и донного шлака

Содержание соединений % масс.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	TiO_2	Другие компоненты	Потери при прокаливании
Зола-унос	28,2	11,5	16,4	3,7	2,4	28,1	2,1	3,1	4,5
Донный шлак	54,2	23,0	8,5	2,5	2,1	1,5	0,6	3,4	4,2



ском заводе сантехнических изделий «TOTO» в результате дробления бракованных изделий и отходов производства, ежемесячное количество которых достигает почти 20 т, и использованный в качестве инертной минеральной добавки для уплотнения структуры бесцементного бетона.

Известковый порошок (ИП) белого цвета (рис. 5), представляющий собой гашеную известь с содержанием $Ca(OH)_2$ более 90%, размером частиц от нескольких микронов до 0,15 мм, истинной плотностью 2,21 г/см^3 и частично растворимый в воде (0,185 г/мл).

Рис. 4. Керамический порошок «TOTO»

Высушенные и просеянные шламовые отходы (ШО) завода по производству глинозема «Тан Рай» с размером частиц от 0,14 до 2,5 мм (рис. 6).

Кокосовое волокно (КВ), отделяемое от скорлупы кокосовых орехов в ходе их обработки, со средним диаметром порядка 1,5 мм и длиной 15–20 мм, на 70–90% состоящее из целлюлозы (рис. 7).

Рис. 5. Известковый порошок

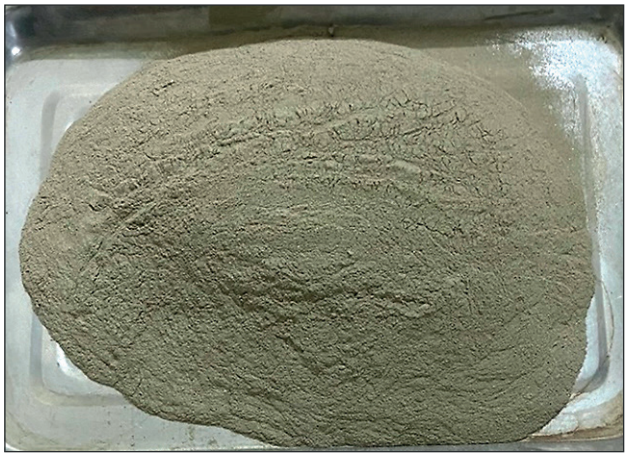


Рис. 6. Шламовые отходы производства глинозема

Рис. 7. Кокосовое волокно

Активирующий щелочной раствор состоял из смеси двух водных растворов: 10 М раствора гидроксида натрия (рис. 8а) и раствора двух с половиной водного силиката натрия (рис. 8б) производства фирмы «Viet-Nhat» с плотностью, соответственно, 1,45±0,01 г/см^3 и 1,55±0,01 г/см^3, в соотношении Na_2SiO_3/NaOH = 2,5 [27, 28]. Его процентный состав по массе: NaOH = 12%; Na_2SiO_3 = 30% и вода = 58%.

В табл. 3 представлены химический состав и физические свойства использованного раствора силиката натрия.

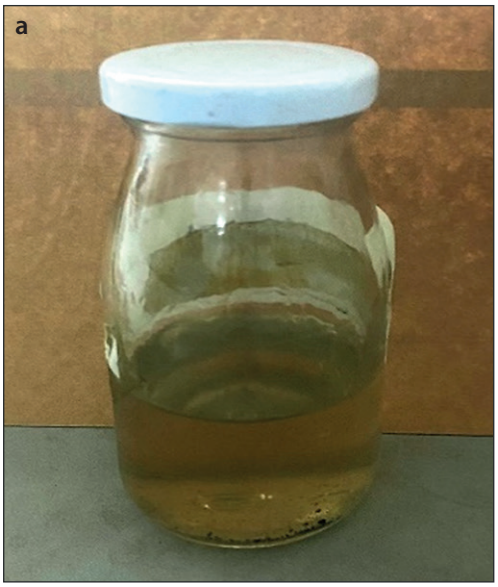


Рис. 8. Активирующий щелочной раствор: а – 10 М раствора гидроксида натрия; б – раствора двух с половиной водного силиката натрия

Таблица 3. Химический состав и физические свойства раствора силиката натрия

Химическая формула	$Na_2SiO_3 \cdot 2,5H_2O$
Na_2O	11,8%
SiO_2	29,5%
H_2O	58,7%
Цвет и внешний вид	Светло-желтая гелеобразная жидкость
Плотность водного раствора	1,55 ±0,01 г/см³

Вода затворения (В) соответствовала требованиям вьетнамского стандарта TCVN 4506:2012[1].

Методы. Методология работы включала:

Для определения состава бетонной смеси для получения бесцементного «зеленого» бетона был использован метод абсолютных объемов.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с действующими вьетнамскими стандартами:

– среднюю плотность бетона определяли на образцах-кубах размером 100x100x100 мм согласно TCVN 3115:2022[2];
– водопоглощение бетонных образцов определяли на образцах-кубах размером 100x100x100 мм согласно TCVN 3113:2022[3] (рис. 9);
– прочность разработанного бетона на сжатие определяли испытанием образцов-кубов размером 100x100x100 мм в соответствии с требованиями TCVN 3118:2022[4] (рис. 10);
– способность бетонных образцов поглощать углекислый газ определялась следующим методом: углекислый газ из баллона по гибкому шлангу в течение 10 мин. Подавался в герметичный резервуар, в котором находились бетонные образцы в виде многопустотных кирпичей (рис. 11).

Масса CO_2, поглощенного бетонным образцом в результате его принудительной карбонизации, рассчитывалась по формуле:

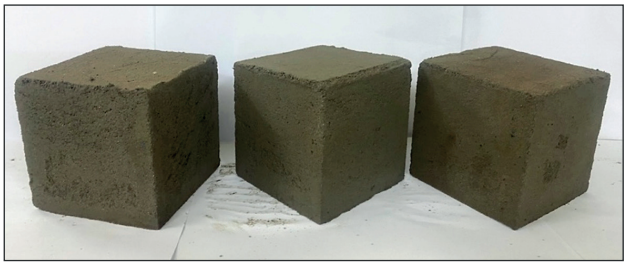


Рис. 9. Образцы-кубы размером 100×100×100 мм из разработанного бесцементного «зеленого» бетона

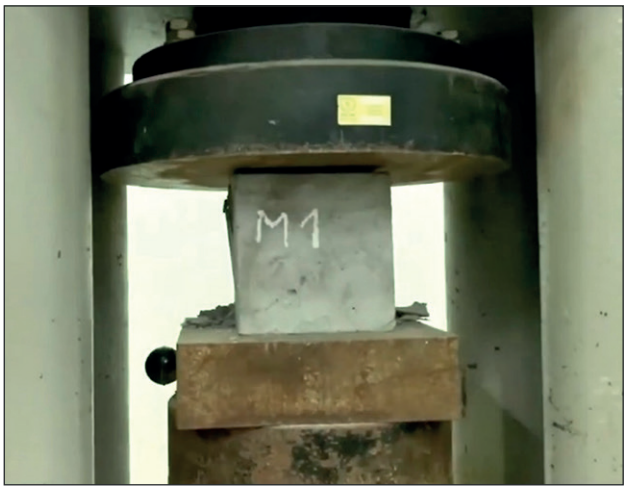


Рис. 10. Испытание бетонных образцов на сжатие

$$m_{CO_2} = m_2 - m_1,$$

где m_1 – масса бетонного образца до карбонизации, г; m_2 – масса бетонного образца после завершения карбонизации, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав бетонной смеси для получения бесцементного «зеленого» бетона приведен в табл. 4.

Для оценки способности бетона разработанного состава поглощать углекислый газ были использованы бетонные образцы с размерами 220×110×60 мм, соответствующими размерам используемого во Вьетнаме стандартного бетонного кирпича[5].

Были получены следующие результаты испытаний:

– средняя плотность разработанного бетона в возрасте 28 суток составляет 1950 кг/м³ (рис. 12);
– прочность разработанного бетона на сжатие в возрасте 28 суток составляет 7,5÷11,5 МПа;
– водопоглощение по массе – 8÷10% масс.;
– масса одного образца-кирпича разработанного «зеленого» бетона размером 220×110×60 мм с шестью пустотами цилиндрической формы составляет 1,5÷2,2 кг.

[1] Строительный стандарт Вьетнама TCVN 4506:2012. Вода для затворения бетона и строительного раствора. Технические требования [Water for mixing concrete and mortar – Technical requirements] (In Viet).

[2] Строительный стандарт Вьетнама TCVN 3115:2022. Затвердевший бетон. Метод определения плотности [Hardened concrete – Test method for density] (In Viet).

[3] Строительный стандарт Вьетнама TCVN 3113:2022. Затвердевший бетон. Метод определения водопоглощения [Hardened concrete – Test method for water absorption] (In Viet).

[4] Строительный стандарт Вьетнама TCVN 3118:2022. Затвердевший бетон. Метод определения прочности на сжатие [Hardened concrete – Test method for compressive strength] (In Viet).

Рис. 11. Карбонизация образцов разработанного бетона в процессе их твердения

Таблица 4. Состав 1 м^3 бетонной смеси для получения бесцементного «зеленого» бетона

Сырьевые материалы	ЗУ	ДШ	КП	ИП	ШО	КВ	NaOH	$Na_2SiO_3 \cdot 2{,}5H_2O$	В	Всего
Масса, кг	360	280	100	100	250	50	160	518	150	1968

Рис. 12. Определение средней плотности разработанного бетона в возрасте 28 суток

Важной особенностью является способность бетонных кирпичей разработанного состава поглощать углекислый газ в ходе твердения благодаря наличию в их составе гашеной извести. Согласно полученным результатам, каждый такой образец-кирпич размером 220×110×60 мм с шестью пустотами обладает способностью поглощать около 15÷20 г CO_2 (рис. 13).

Кроме того, при изготовлении одного такого образца используется около 1,5 кг промышленных отходов и абсолютно не используются природные материалы. Таким образом, в результате получе-

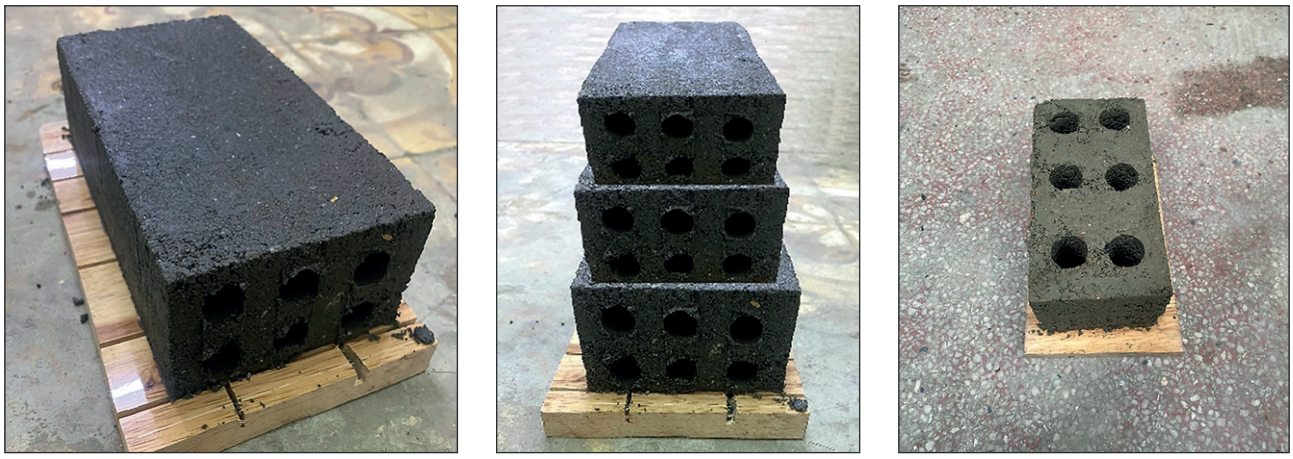


Рис. 13. Образцы разработанного бетона в форме кирпичей стандартного размера с пустотами, способные поглощать углекислый газ

ния 1 м^3 бетона разработанного состава может быть утилизировано порядка 1,1 т многотоннажных промышленных отходов в виде золы-уноса и донных шлаков теплоэлектростанций, металлургических шлаков, порошкообразных керамических отходов, а также шламов горнодобывающих и обрабатывающих предприятий. Поэтому внедрение полученных результатов данного исследования будет способствовать развитию во Вьетнаме устойчивой «зеленой» экономики и минимизации риска загрязнения окружающей среды выбросами парниковых газов и многотоннажными промышленными отходами.

К основным преимуществам разработанного бесцементного бетона, способного поглощать углекислый газ, относятся:

– сокращение выбросов парниковых газов: по оценкам, каждый 1 м^3 разработанного бетона способен поглощать около 10÷13 кг выбросов CO_2, тем самым улучшая качество воздуха;
– сохранение природных ресурсов за счет использования многотоннажных промышленных отходов и отказа от использования портландцемента, для производства которого требуется природное сырье и которое сопровождается значительными выбросами углекислого газа;
– реализация возможности защиты окружающей среды от загрязнения многотоннажными промышленными отходами в результате их использования в качестве основного сырья для получения разработанного «зеленого» бетона, что способствует развитию экономики замкнутого цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа современного состояния и дальнейших перспектив развития производства во Вьетнаме строительных материалов с низким углеродным следом можно сделать следующие выводы:

1. Научная группа «Зеленый бетон» Ханойского горно-геологического университета надеется, что полученные результаты проведенных исследований, направленных на вовлечение в производство строительных материалов во Вьетнаме многотоннажных промышленных отходов, могут стать прорывным решением для получения материалов с низким углеродным следом, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами, высокой потребительской ценностью и низкой стоимостью. Производство таких материалов будет способствовать сбережению невозобновляемых природных ресурсов и благоприятно скажется в области защиты окружающей среды от загрязнения, поскольку получение 1 м^3 бесцементных «зеленых» бетонов позволит утилизовать порядка 1,1 т многотоннажных промышленных отходов. Таким образом, результаты проведенных исследований будут способствовать реализации во Вьетнаме намеченного политического курса на «зеленую» трансформацию экономики в устойчивую экономику замкнутого цикла.

2. Установлено, что 1 м^3 разработанного бесцементного «зеленого» бетона обладает способностью поглощать 10÷13 кг углекислого газа. Это будет способствовать достижению заявленной цели достижения нулевого выброса парниковых газов во Вьетнаме к 2050 году, как было обещано премьер-министом Социалистической Республики Вьетнам на 26-ой Конференции ООН по вопросам изменения климата.

3. Однако в настоящее время существует большое количество препятствий, мешающих внедрению экологически чистых строительных материалов с низким углеродным следом в реальные строительные проекты во Вьетнаме. Их устранение требует дальнейшего проведения более комплексных научных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ляпидевская О.Б. Экономическая и экологическая эффективность строительных материалов с низким содержанием углерода. *Альманах Крым*. 2022; 34:13-20. – EDN: MLDAMQ.

2. Скобелев Д.О., Федосеев С.В. Политика повышения ресурсоэффективности и формирования экономики замкнутого цикла. *Компетентность*. 2021;3:5-13. https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-3-05-14

3. Omar W.M.S. A hybrid life cycle assessment of embodied energy and carbon emissions from conventional and industrialised building systems in Malaysia. *Energy Build*. 2018;167:253-268. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.045

4. Neupane K. High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges. *Advances in Materials*. 2018;7(2):15-25. https://doi.org/10.11648/j.am.20180702.11

5. Oluwole Akadiri P. Investigating factors influencing building materials selection in Nigerian construction industry. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2018;6(4):154-157. https://doi.org/10.12691/ajcea-6-4-4

6. Zhang S., Xiang X., Ma Z., Ma M., Zou C. Carbon neutral roadmap of commercial building operations by mid-century: Lessons from China. *Buildings*. 2021;11(11):510. https://doi.org/10.3390/buildings11110510

7. Venkatarama Reddy, B.V. Sustainable materials for low carbon buildings. *Int. J. Low Carbon Technol*. 2009; 4:175–181. http://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025

8. Cabeza L.F., Rincón L., Vilariño V., Pérez G., Castell A. Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:394–416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037

9. Zhang, N., Yu K., Chen Z. How does urbanization affect carbon dioxide emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy, Elsevier*. 2017;107(C):678–687. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.072

10. Arup & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). *Material Choice for Green Buildings*; 2012. Available online: https://docs.wbcsd.org/2012/01/WBCSD_Material_choice_for_green_buildings.pdf (accessed: 25.10.2021).

11. Ahmed Ali K., Ahmad M.I., Yusup Y. Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*. 2020; 12(18):7427. http://doi.org/10.3390/su12187427

12. Chan. M., Masrom M.A.N., Yasin S.S. Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives. *Buildings*. 2022; 12(4):486. https://doi.org/10.3390/buildings12040486

13. Пунг Куок Хай. Проект по улавливания и хранению CO_2 в Японии и его потенциальное применение во Вьетнаме. Азиатско-Тихоокеанский центр энергетических исследований (APERC). Сентябрь 2023. https://nangluongvietnam.vn/du-an-thu-giu-luu-tru-co2-tomakomai-nhat-ban-va-tiem-nang-ap-dung-tai-viet-nam-31523.html. (Вьетнам).

14. Khozin V., Khokhryakov O., Nizamov R. A «carbon footprint» of low water demand cements and cement-based concrete. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;890(1):012105. https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012105

15. Andrew R.M. (2018). Global CO_2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018;10(1):195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018

16. Гончарова М.А., Матченко Н.А. Разработка составов геополимерного бетона для конструкционного материала. *Научные исследования: от теории к практике: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф.* 2015;2:4(5):15–18.

17. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Effect of Complex Organo-Mineral Modifier on the Properties of Corrosion-Resistant Concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251 (01005). https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101005

18. Van Lam Tang, Trong Chuc Nguyen, Xuan Hung Ngo, Van Phi Dang, Boris Bulgakov, Sophia Bazhenova. Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages. *MATEC Web of Conferences*. 2018;193(03024). https://doi.org/10.1051/matecconf/201819303024

19. Van Lam Tang, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Sophia Bazhenova. Combined Effect of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light - Weight Concrete Properties. *MATEC Web of Conferences* 2018;251(01007). https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101007

20. Pham Chi Cuong. The use of waste from the metallurgical industry in Vietna. *Journal of Science of Vietnam*. 2012;6(10):52-54.

21. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Булгаков Б. И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Орехова А.Ю., Тюрина А.А. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала. *Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»*. 2018;08:19-27. https://doi.org/10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511

22. Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. Возможность использования зольных остатков для производства материалов строительного назначения во Вьетнаме. *Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»*. 2017;06:06-12. https://doi.org/10.12737/article_5926a059214ca0.89600468

23. Huynh Nguyen Duc, Phuong Le Thi. Implications and changes of world's battle against climate change after the US withdrew from Paris Agreement. *Petrovietnam Journal*. 2017;09:57-62. https://doi.org/10.25073/petrovietnam-journal.v9i0.204 (In Viet).

24. 7th International Conference of Asian Concrete Federation. Hanoi. Vietnam. October 2016. Available online: https://moc.gov.vn/tl/tin-tuc/7716/hoi-nghi-quoc-te-lan-thu-7-cua-lien-doan-be-tong-chau-a.aspx (In Viet). (accessed: 25.10.2021).

25. Tan Van Lam, Wu Kim Dien. The possibility of using metallurgical industry waste in the production of building materials. *Journal of Science and Technology, Ministry of Industry and Trade*. 2020;43:12-17 (In Viet).

26. Lam T.V., Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Anh P.N. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:1-10. https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032007

27. Танг В.Л., Нго С.Х., Ву К.З., Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов. *Строительство: наука и образование*. 2021;11(2):1-10. https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.2.2

28. Tang V.L., Bulgakov B.I. The possibility of using ash-slag waste and rice husk ash on geopolymer concrete for the construction of building in Vietnam. *BDU Journal of Science & Technology*. 2021;03(01):26-39 (In Viet).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Танг Ван Лам – кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам, tangvanlam@humg.edu.vn, https://orcid.org/0000-0002-4857-835X

Нгуен Чонг Зунг – кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам, nguyentrongdung@humg.edu.vn, https://orcid.org/0000-0002-8515-8469_

Булгаков Борис Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, BulgakovBI@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4737-8524

Александрова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, AleksandrovaOV@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1791-8515

ВКЛАД АВТОРОВ

Танг В.Л. – концепция исследования, валидация, формальный анализ, ресурсы, надзор, администрирование проекта, привлечение финансирования.

Нгуен Ч.З. – концепция исследования, программное обеспечение, исследование, написание исходного текста.

Булгаков Б.И. – методология, проверка, обработка данных, обзор и редактирование, администрирование проекта.

Александрова О.В. – методология, валидация, визуализация, администрирование проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 08.02.2025; принята к публикации 12.02.2025.

PUBLICATION ETHICS AND PREVENTION OF MALPRACTICE PUBLICATION

Compliance requirements of publication ethics in the preparation and publication of the journal Science Editor and Publisher apply to all members of the publishing process, i.e., authors, editors, reviewers, and the publisher of the journal. The editorial board monitors compliance with the ethics requirements based on the manuals prepared by international specialized organizations, associations and publishers, as well as the Association of Science Editors and Publishers. The main standards relied on by the journal «Nanotechnologies in construction» are those developed by the Committee on Publication Ethics (Committee on Publication Ethics) in the United Kingdom, by the publisher Elsevier (Netherlands), and other non-Russian editorial associations and information systems, as well as the declaration of «Ethical Principles of Scientific Publications», adopted by the Association of Science Editors and Publishers (Russia).

The responsibility of the authors of material for the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The author submits materials for review, which have not been previously published. If the article is based on previously published material which are not academic articles or based on materials presented on the Internet, the author should notify the editorial staff of the journal.
2. The author does not submit the same article to different journals for review.
3. All co-authors consent to the submission of their articles to the journal.
4. The author should inform the editorial staff about a potential conflict of interest. In the case of the absence of any competing interests the author should claim that by writing «Author declare the absence of any competing interests» in the paper.
5. The author takes the necessary steps to ensure the correctness of citations in the submitted article.
6. The list of authors included only individuals who have made significant contributions to the research.
7. The author correctly cites his or her previous work as to avoid self-plagerism in the manuscript and the artificial increase of volume of publications (salami-slicing).
8. The author, who is acting as the contact with journal, informs all other co-authors of all changes and suggestions from the editorial staff, and does not make decisions regarding the article alone without the written consent of all co-authors.
9. The author properly corresponds with the reviewer through contact with the editor and responds to comments and observations if they arise.
10. If necessary, the authors either adjust the data presented in the article, or refute them.

Responsibility of the editors of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editors are personally and independently responsible for the content of the materials published and recognize that responsibility. The reliability of the work in question and its scientific significance should always be the basis in the decision to publish.
2. The editors of the journal can check the materials with anti-plagiarism system «Antiplagiat» detecting borrowed fragments to provide copyright protection.
3. The editors make fair and objective decisions, regardless of any commercial considerations and provide a fair and efficient process for the independent review.
4. The editors evaluate manuscripts' intellectual content without regard to race, gender, sexual orientation, religion, origin, nationality, and/or the political preferences of the authors.
5. The editors do not work with articles for which they have a conflict of interest.
6. The editors resolve conflict situations arising during the editorial process, as well as use all available means to resolve these situations.
7. The editors of the journal publish information concerning corrections, rebuttals, and review articles in case the need arises.
8. The editors of the journal do not publish the final version of the article without the consent of the authors.

The responsibility of the reviewers of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The reviewer evaluates his or her own availability before the examination of the manuscript and accepts materials for review only if the reviewer is able to allow for sufficient time as to ensure the quality his or her work.

2. The reviewer must use the form created by the editors and delivered with paper. The reviewer may give extended review.

3. The reviewer notifies the editorial staff of any conflict of interest (if one exists) before the start of the review of the paper.

In the case of the absence of any competing interests the reviewer should claim that by writing «The reviewer declares the absence of any competing interests» in the review.

4. The reviewer does not send information about the article and or any of the data contained within the article to any third party.

5. The reviewer does not use the information obtained from the article for any personal and or commercial purposes.

6. The reviewer does not make conclusions about the quality of the article on the basis of subjective data, e.g. the personal relationship to the author, gender, age, religion, etc.

7. The reviewer uses only proper and appropriate language and explanations in respect to the articles, avoiding any personal remarks.

The responsibility of the publisher of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The publisher not only supports scientific communication and invests in the process, but is also responsible for complying with all current guidelines and standards for publishing scientific work.

2. The publisher does not affect the editorial policy of the journal.

3. The publisher provides legal support to the journal if necessary.

4. The publisher provides for the timely release of futures issues of the journal.

5. The publisher publishes changes, explanations, and recalls articles that have been identified to contain scientific misconduct and or critical errors.

The responsibility of the editor-in-chief of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editor-in-chief is responsible for making a decision which of submitted papers are to be published in the journal. This decision always must be based on the examination of paper reliability and its importance for scientists and readers. The editor-in-chief may be guided by methodical recommendation elaborated by the editorial board of the journal. He also may take into account legal requirements, such as exclusion of libel, infringement of copyright and plagiarism. When making decision on the publication, the editor-in-chief may consult with the members of editorial board, reviewers.

2. The editor-in-chief evaluates submitted papers by the intellectual content, regardless of the race, sex, sexual preference, religion, ethnic origins, citizenship and political views of the author.

3. The editor-in-chief, editorial staff, members of the editorial board must not disclose information on the submitted manuscript to the third person except for the author, reviewers, potential reviewers, and the publisher.

4. The information contained in the submitted paper cannot be used in the paper of the editor-in-chief, members of the editorial board without author's written permission. Confidential information or ideas obtained during review must be kept in secret and must not be used for self-profit.

5. The editor-in-chief should not review the paper if there is a conflict of the interests evolving from competition, cooperation or other relations with someone from the authors, companies and organizations which are related to the paper.

6. The editor-in-chief should ask all authors to present information on the certain competitive interests and publish corrections if the conflict of the interests has been revealed after the publication. If necessary another appropriate action such as publication of disproof or expression of a concern can be performed.

7. The editor-in-chief should take reasoned and prompt measures if he gets complaints of ethnic character in respect to the submitted manuscript or issued paper, contacting with the editors and publisher.

Complaints and appeals handling

In the case of incoming complaints and appeals a commission is formed. The commission can consist of the publisher, the editor-in-chief, deputy editor-in-chief, members of editorial council, authors and specialists which are competent in the considering subjects.

An investigation is held and the results of it are reported to all interested parties. According to laws, if it is necessary, the materials are delivered to competent state bodies.

Policy of disclosure and conflicts of interest /competing interests

Unpublished data from manuscripts submitted for consideration can not be used for personal research without the expressed written consent of the author.

Information or ideas obtained through peer review and related actives, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

The politics of the journal concerning data exchange and reproductibility

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

Ethical oversight of the published materials

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

Derivation and plagiarism

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

Intellectual property

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

– support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
– cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

Preprint and postprint policy

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.

On the procedure in case of abusive practice (infringement)

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.

ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике (Committee on Publication Ethics), Великобритания, издательства Elsevier (Нидерланды) и других зарубежных редакторских ассоциаций и информационных систем, а также Декларация «Этические принципы научных публикаций», принятая Ассоциацией научных редакторов и издателей (Россия).

Ответственность авторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Автор отправляет на рассмотрение статью, материалы которой ранее не были опубликованы. Если статья основана на ранее опубликованных материалах не статейного характера или материалы представлены в Интернете, следует уведомить об этом редакцию журнала.
2. Автор не отправляет на рассмотрение одну статью в разные журналы.
3. Все соавторы согласны на представление статьи в журнал.
4. Автор уведомляет редакцию о потенциальном конфликте интересов. Об отсутствии конфликта интересов автор указывает в статье – «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».
5. Автор предпринимает необходимые меры, чтобы убедиться в корректности представленных в статье цитирований.
6. В список авторов включаются только лица, внесшие значительный вклад в проведение исследования.
7. Автор корректно цитирует свои предыдущие работы и избегает самоплагиата в рукописи и искусственного увеличения объема публикаций (salami-slicing).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самолично и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе Антиплагиат по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторов.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.

Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.

2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.

3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.

Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».

4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.

5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.

6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.

7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.

2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.

3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.

4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.

5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлегией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлегии, рецензентами.

2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.

3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлегии не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.

4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлегии без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.

5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.

6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.

7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.

Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и аппеляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редколлегии, организуя немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

Заимствования и плагиат

Редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы Антиплагиат. В случае обнаружения многочисленных заимствований редакция действует в соответствии с правилами COPE.

Интеллектуальная собственность

Редакторы должны внимательно относиться к вопросам, касающимся интеллектуальной собственности, и взаимодействовать с издателем при урегулировании случаев возможных нарушений законов и соглашений об охране интеллектуальной собственности.

Редакторы, кроме применения инструментов обнаружения плагиата, могут также:

– поддерживать авторов, чье авторское право было нарушено, или тех, кто стал жертвой плагиата;
– быть готовыми к совместной работе с издателем по защите авторских прав и к преследованию нарушителей (например, путём подачи запросов для отзыва статей или удаления материалов с веб-сайтов).

Обсуждение работ, опубликованных в журнале. Исправления после публикаций

Редакторы должны быть открытыми для исследований, которые оспаривают предыдущие работы, опубликованные в журнале; поощрять и с готовностью рассматривать обоснованную критику работ, публикуемых в их журнале.

Авторы критикуемых материалов должны иметь возможность ответить на критику. Работы, сообщающие только об отрицательных результатах, также могут публиковаться.

Политика размещения препринтов и постпринтов

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке на опубликованную в журнале «Нанотехнологии в строительстве» статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

О процедурах в случае злоупотреблений (нарушений)

Издатель, главный редактор, каждый сотрудник редакции, член редакционной коллегии, автор, рецензент и читатель обязаны соблюдать этику научных публикаций в журнале действующих законов, правил или положений и обязуются сообщать о любых известных случаях уже совершенного или потенциального злоупотребления (нарушения).

Редакцией журнала незамедлительно проводится расследование по всем сообщениям о злоупотреблениях (нарушениях) и, если информация подтверждается, принимаются меры по устранению злоупотреблений (нарушений). Если это требуется в соответствии с законодательством, материалы передаются в соответствующие государственные органы.

На все претензии авторов редакция предоставляет развернутые и обоснованные ответы, прилагая все усилия для разрешения конфликтных ситуаций.

AUTHOR GUIDELINES

Admission of articles

The authors submit to the editors:

- electronic manuscript by e-mail: info@nanobuild.ru;
- accompanying letter (the editors send the sample of the letter to the authors on demand).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); agree to publish full texts (parts or metadata) of the paper in free access in Internet at the official website of the edition (www.nanobuild.ru), citation systems (data bases). All that authors indicate in the cover letter. More details about the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) are available here https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

When submitting articles to the journal, it is presumed that:

- the work has not been previously published in any other journal;
- the article is not under consideration in any other journal;
- all co-authors consent to the publication of the article;
- there is implicit or explicit consent of the organization in which the study was conducted.

Information about the conflict of interest

The article should exclude any actual or potential conflict of interest. If there is no conflict of interest, you should write that «the author declares no conflict of interest.»

When submitting a manuscript to the journal, authors should ensure that the content of the paper corresponds the topic of the journal; the structure and the format of the paper meet the editorial requirements; all citations are properly formatted and the source of tables and figures are shown (unless otherwise indicated, it is assumed that the tables and figures created by the author).

Basic 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 nanomaterials and nanotechnologies 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. The first letter of the patronymic (if any) 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) They are separated from each other by commas and there are no dots placed after the last one
Acknowledgments: (if available) (In English)
For citation: (In English)

Example.
For citation: Nizin D.R., Nizina T.A., Spirin I.P., Chibulaev I.A., Pivkin N.A. The effect of the concentration of nanomodifiers and the moisture content of samples on the change in the properties of epoxy polymers. *Nanotechnologies in Construction.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

© authors, 2025

Text of the paper: (In English, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (In English) (according to Vancouver Style).

Example:
1. Nizin D.R., Nizina T.A., Maryanova A.V., Mironov E.B. Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic Samples. *Bulletin of MGSU.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. Science. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Mekeko N., Tikhonova E. Description of Author Contributions while Submitting a Manuscript: The CREDITSystem. *Journal of Employment and Career.* 2022;1(4):5–7. (In Russ.) https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Note: 1. The titles of journals, books, etc. are indicated in italics.
2. Materials published only in Russian are indicated (In Russ.)

Additional information (on the use of generative artificial intelligence and artificial intelligence-based technologies) (In English)

Examples:
The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
or
During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After employing this tool/service, the content has been revised and edited as needed and I take full responsibility for the content of the published article.

Information about the author (authors) (In English)
– First name The first letter of the patronymic (if any) Last name (full);
– academic degree;
– academic title;
–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.), 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 First name The first letter of the patronymic (if any) Last name (full); author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, 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) / (In English)
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: Низин Д.Р., Низина Т.А., Спирин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А. Влияние концентрации наномодификаторов и влагосодержания образцов на изменение свойств эпоксидных полимеров. *Нанотехнологии в строительстве.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

Article Metadata (In English)
The title of the article (In English)
First name The first letter of the patronymic (if any) Last name of the author(s) (In English)
mandatory indication of the affiliation for each author, city, country (In English)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx
Abstract: Introduction… Methods and Materials… Results… Discussion…Conclusion…(In English)
Keywords: (In English)
Acknowledgments: (if any) (In English)
For citation: (In English)

© authors, 2025

Text of the paper: (In Russian, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (in the original language of the article – Russian or English) (Vancouver Style)

Example:
1. Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика. *Вестник МГСУ.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. Science. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Мекеко Н.М., Тихонова Е.В. Описание авторского вклада при подаче рукописи: система CREDIT. *Журнал Работа и Карьера.* 2022;1(4):5–7. https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Note: 1. The titles of journals, books, etc. are indicated in italics.

Additional information (on the use of generative artificial intelligence and artificial intelligence-based technologies) (In Russian)

> ***Examples:***
> The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
> *or*
> During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After employing this tool/service, the content has been revised and edited as needed and I /we take full responsibility for the content of the published article.

Information about the author (authors) (In Russian)
– Last name First name Patronymic (if any) (full);
– academic degree;
– academic title;
– name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc. (affiliation);
– 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** – доктор экономических наук, профессор 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

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, etc.).

> ***Example.***
> **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).

The editorial board would like to remind the authors to take into account the citation policy of the journal when preparing the References section.

A proper citation (References) not only shows the quality of the research, but it also ensures that the cited publications will be taken into account when assessing the scientific work of the author. International indexing databases format all submitted references according to a unified structure. Therefore, strict requirements for unification and standardization apply to this section of scientific articles.

The journal uses an adapted version of Vancouver Citation Style, one of the styles recognized by international indexing databases.

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 наноиндустрии;
- разработка новых материалов;
- рациональное использование природных ресурсов;
- эффективное использование вторичного сырья;
- применение наноматериалов и нанотехнологий в строительстве;
- системные решения технологических проблем;
- в смежных отраслях;
- форумы, выставки, конференции, мероприятия строительной отрасли и наноиндустрии.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с нанопокрытием; формирование наноструктурных покрытий лазерным напылением; системы преподавания основ нанотехнологий; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: научные статьи, обзорные статьи, редакционные статьи, дискуссионные статьи, редакторские заметки, рецензии на книгу, рецензии на статью и т. п.

Структура статьи (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021)

НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (In English)
Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, paper reviews, etc.) (In English)
https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x

Заглавие статьи (In English)
Имя, первая буква отчества (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) отделяют друг от друга запятыми, после последнего точку не ставят
Acknowledgments: (при наличии) (In English)
For citation: (In English)

Пример:
For citation: Nizin D.R., Nizina T.A., Spirin I.P., Chibulaev I.A., Pivkin N.A. The effect of the concentration of nanomodifiers and the moisture content of samples on the change in the properties of epoxy polymers. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

© authors, 2025

Статья ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSION**

References (In English) (согласно Vancouver Style).

Примеры:
1. Nizin D.R., Nizina T.A., Maryanova A.V., Mironov E.B. Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic Samples. *Bulletin of MGSU*. 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. *Science*. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature*. 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a

4. Mekeko N., Tikhonova E. Description of Author Contributions while Submitting a Manuscript: The CREDIT System. *Journal of Employment and Career.* 2022;1(4):5–7. (In Russ.) https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом. 2. В материалах, опубликованных только на русском языке, указывается (In Russ.)

Additional information (об использовании технологий генеративного искусственного интеллекта и технологий, основанных на искусственном интеллекте) (In English)

Примеры:
The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
(Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте).
или
During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After using this tool/service, the content has been revised and edited as necessary, and I assume full responsibility for the content of the published article.
(Во время подготовки этой статьи был использован [название инструмента/сервиса] по [причине]. После использования этого инструмента/сервиса пересмотрен и отредактирован контент по мере необходимости, беру(ем) на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи).

Information about the author (authors) (In English)
– Имя, первая буква отчества (при наличии), фамилия автора;
– ученая степень;
– ученое звание;
– 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 (при наличии) и фамилия автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста 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) / (на английском 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:** Низин Д.Р., Низина Т.А., Спирин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А. Влияние концентрации наномодификаторов и влагосодержания образцов на изменение свойств эпоксидных полимеров. *Нанотехнологии в строительстве.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

Метаданные статьи (In English)
Заглавие статьи (In English)
Имя, первая буква отчества (при наличии), **фамилия автора** (-ов) (In English)
обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx
Abstract: Introduction… Methods and Materials… Results… Discussion…Conclusion… (In English)
Keywords: (In English)
Acknowledgments: (при наличии) (In English)
For citation: (In English)

© авторы, 2025

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)

Пример:

1. Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика. *Вестник МГСУ.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. *Science.* 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Мекеко Н. М., Тихонова Е. В. Описание авторского вклада при подаче рукописи: система CREDIT. *Журнал Работа и Карьера.* 2022;1(4):5–7. https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом.

Дополнительная информация (об использовании технологий генеративного искусственного интеллекта и технологий, основанных на искусственном интеллекте) (на русском языке)

Примеры:

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

или

Во время подготовки этой статьи был использован [название инструмента/сервиса] по [причине]. После использования этого инструмента/сервиса пересмотрен и отредактирован контент по мере необходимости, беру(ем) на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи.

Информация об авторе (-ах) (на русском языке)

– фамилия, имя, отчество автора (полностью);
– ученая степень;
– ученое звание;
– 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 – доктор экономических наук, профессор 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 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 Times New Roman 14 пт 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).
Редакция рекомендует авторам при подготовке References учитывать политику цитирования, принятую в журнале.
Правильное описание используемых источников (References) не только демонстрирует качественный уровень исследования, но и является гарантией того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее авторов. Международные индексирующие базы данных преобразуют все представленные ссылки по единой структуре. В связи с этим к этому блоку научной статьи предъявляются строгие требования унификации и стандартизации.
В журнале принят адаптированный вариант Ванкуверского стиля цитирования, который является одним из стандартов, признанных международными базами данных.

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.

Авторские права

Авторы, публикующиеся в журнале, соглашаются со следующим:
1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.
3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или на персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большему количеству ссылок на данную работу.

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.