

IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive
- Development of artificial hydraulic lime
- Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin
- Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect
- Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой
- Разработка искусственной гидравлической извести
- Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами
- Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания

www.nanobuild.ru

e-mail: info@nanobuild.ru

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE
OF INTELLECTUAL
PROPERTY (CHINA)

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

ISSN 2075-8545 (online)

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

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

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

The main tasks:

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

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

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

The journal 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 of Informatics and Radioelectronics, Department «Information Security», Minsk, Belarus

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The Journal is registered as an independent mass media in the Ministry of Communication and Mass Media of the Russian Federation. (Registration Certificate ЭЛ № ФЦ77 – 35813 of 31 March 2009 issued by the Federal Service on Supervision in the Sphere of Connection and Mass Communications).

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

Contacts: e-mail: la.ivanov@mail.ru

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

Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru

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

Release date of № 2 Vol. 18 is 20.04.2026

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE
OF INTELLECTUAL PROPERTY
(CHINA)

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION	134
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Samchenko S.V., Korshunov A.V.</i> Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive.....	137
<i>Zhukov A.D., Nikolaev D.R., Zhuk P.M., Medvedev A.A., Yefimov B.A., Bobrova E.Yu.</i> Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods	149
<i>Loganina V.I., Garkina I.A. Tkach E.V., Stepina I.V.</i> Development of artificial hydraulic lime.....	159
<i>Epikhin S.D., Inozemtsev A.S.</i> Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration.....	167
<i>Andronov S.Yu., Vasiliev Yu.E., Kochetkov A.V., Slepnev P.A., Chizhikov I.A.</i> Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system	180
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Abdykalykov A., Aidaraliev Z.K., Abdykalyk kyzy Zh., Sopubekov N.A., Suiunbek uulu A.</i> Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers.....	192
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Serebryakov S.V., Ruchiy A.Yu., Samoylova Yu.M.</i> Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect	210
<i>Stepina I.V., Zhukov A.D., Strokova V.V., Bazhenova S.I.</i> Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste	232
THE RESULTS OF THE SPECIALISTS' AND SCIENTISTS' RESEARCHES	
<i>Shilova T.V., Ivanova O.A., Serdyukov A.S.</i> Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin	242
<i>Larsen O.A., Alobaidi D., Samchenko S.V.</i> Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber	254
PUBLISHING ETHICS	265
AUTHOR GUIDELINES	269

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

ISSN 2075-8545 (online)

«Нанотехнологии в строительстве» – рецензируемый научный журнал.

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

Основные задачи:

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

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

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

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

Язык издания: русский; английский.

Авторами и читателями издания являются:

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

РЕДАКЦИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Контакты: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

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

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

Дата выхода в свет № 2, Том 18, 2026: 20.04.2026 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



РОССИЙСКОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



МЕЖДУНАРОДНОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)



ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	134
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Самченко С.В., Коршунов А.В.</i> Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой	137
<i>Жуков А.Д., Николаев Д.Р., Жук П.М., Медведев А.А., Ефимов Б.А., Боброва Е.Ю.</i> Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов	149
<i>Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В.</i> Разработка искусственной гидравлической извести	159
<i>Епихин С.Д., Иноземцев А.С.</i> Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации	167
<i>Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Кочетков А.В., Слепнев П.А., Чижиков И.А.</i> Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок»	180
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
<i>Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Сопубеков Н.А., Суйунбек уулу А.</i> Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей	192
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<i>Черкашина Н.И., Павленко В.И., Серебряков С.В., Ручий А.Ю., Самойлова Ю.М.</i> Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания	210
<i>Степина И.В., Жуков А.Д., Строкова В.В., Баженова С.И.</i> Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов	232
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ	
<i>Шилова Т.В., Иванова О.А., Сердюков А.С.</i> Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами	242
<i>Ларсен О.А., Альбаиди Д., Самченко С.В.</i> Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида	254
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	265
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	269

Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive

Svetlana V. Samchenko , Andrey V. Korshunov* 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: korshunovav@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The extension of the range of binders, aggregates, and fillers as well as functional additives and structural modifiers for concrete and composite materials currently allows for the production of innovative materials with enhanced mechanical, physical, and physico-chemical properties. Lightweight structural and functional materials derived from binders of different natures with fillers derived from vegetable raw materials, such as sawdust concrete, arbolite, fibrolite, or xylolite, are of particular interest. The aim of this research was to develop and investigate the properties of a wood-mineral cement-free composite material with a porous structure that has been stabilized using a finely dispersed aluminosilicate additive. **Materials and methods of research.** A cement-free slag-based silicate binder was utilized in the study, comprising ground blast furnace slag and a curing agent – a solution of sodium silicate (sodium liquid glass). A synthetic foam-forming agent with a finely dispersed additive (bentonite) was employed to create the porous structure of the material. Crushed softwood was used as an aggregate. A range of samples were produced, varying the composition within the following parameters: slag 330–440 kg/m³, crushed wood 120–160 kg/m³, and solution-to-slag ratio 0.5–0.7. Several samples were subjected to thermal treatment by heating in a temperature-controlled environment at 80–90 °C and at humidity of at least 90% for 6–12 hours. Samples were examined using mechanical testing methods, thermogravimetric analysis, X-ray diffractometry, porometry, and thermal conductivity measurements. **Results and Discussion.** A cement-free porous wood-mineral composite material (an analogue of arbolite) was obtained. It is shown that the introduction of ground blast furnace slag (330–440 kg/m³) and crushed softwood (125–160 kg/m³) into the mixture at optimal ratios of liquid glass/slag 0.7 and foaming mixture/slag 0.0035 (3.5% foaming agent + 4% bentonite) makes it possible to obtain a composite material with a density of 550–680 kg/m³, compressive strength of 1.35–3.65 MPa, an open porosity of 45–50%, and an average thermal conductivity of 0.08 W/(m·K). The heat and humidity treatment of the composite at 80–90 °C contributes to the achievement of ultimate strength within 10–12 h. The presence of a finely gel-forming additive (bentonite) with particle sizes of 1–5 μm in the foaming mixture helps to stabilize the homogeneous porous structure of the composite material (spherical pore sizes less than 1 mm).

Conclusion. The porous wood-mineral composite material obtained in the work can be used for the production of lightweight non-load-bearing structural elements, as a noise and thermal insulation material.

KEYWORDS: wood-mineral porous composite, slag-silicate binder, finely dispersed structure stabilizer, heat and moisture treatment, strength, water absorption, thermal conductivity

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Samchenko S.V., Korshunov A.V. Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой

Светлана Васильевна Самченко , Андрей Владимирович Коршунов* 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Расширение перечня вяжущих, заполнителей и наполнителей, функциональных добавок и модификаторов структуры бетонов и композитов позволяет в настоящее время получать инновационные материалы с улучшенными механическими, физическими и физико-химическими характеристиками. Представляют интерес легкие конструкционные и функциональные материалы на основе вяжущих различной природы с заполнителями из растительного сырья (опилкобетон, арболит, фибролит, ксилолит и др.). Целью работы являлось получение и исследование свойств бесцементного древесно-минерального композиционного материала с пористой структурой, стабилизированной с использованием высокодисперсной алюмосиликатной добавки. **Материалы и методы.** В работе использовали бесцементное шлакосиликатное вяжущее, включающее молотый доменный шлак и активатор твердения – раствор силиката натрия (натриевое жидкое стекло). Для формирования пористой структуры материала применяли синтетический пенообразователь с высокодисперсной добавкой (бентонит). В качестве заполнителя использовали дробленку хвойных пород. Была получена серия образцов, в которых варьировали компоненты в следующих интервалах: шлак 330–440 кг/м³, древесная дробленка 120–160 кг/м³, отношение затворитель/шлак 0,5–0,7. Часть образцов подвергали термической обработке путем нагрева в термостате при температурах 80–90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч. Образцы изучали с использованием методов механических испытаний, термогравиметрии, РФА, определяли пористость, теплопроводность. **Результаты.** В работе получен бесцементный пористый древесно-минеральный композиционный материал (аналог арболита). Показано, что введение в смесь молотого доменного шлака (330–440 кг/м³) и древесины (125–160 кг/м³) при оптимальных соотношениях жидкое стекло/шлак 0,7 и пенообразующая смесь/шлак 0,0035 (3,5% пенообразователя + 4% бентонита) позволяет получить композиционный материал плотностью 550–680 кг/м³, прочностью при сжатии 1,35–3,65 МПа, открытой пористостью 45–50%, средней теплопроводностью 0,08 Вт/(м·К). Тепловлажностная обработка композита при 80–90 °С способствует достижению марочной прочности в течение 10–12 ч. Присутствие в пенообразующей смеси ультрадисперсной гелеобразующей добавки (бентонит) с размерами частиц 1–5 мкм способствует стабилизации однородной пористой структуры композиционного материала (размеры сфероидных пор менее 1 мм). **Заключение.** Полученный в работе пористый древесно-минеральный композиционный материал может быть использован для производства легких несущих конструктивных элементов, в качестве шумо- и теплоизоляционного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: древесно-минеральный пористый композит, шлакосиликатное вяжущее, высокодисперсный стабилизатор структуры, тепловлажностная обработка, прочность, водопоглощение, теплопроводность

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Самченко С.В., Коршунов А.В. Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

INTRODUCTION

Concrete is a versatile building material with a wide range of compositions, structures, and practical uses. The increasing number of binders, aggregates, additives, and structural modifiers allows for the creation of innovative materials with improved mechanical, physical, and physico-chemical properties [1, 2]. A current trend in the construction industry is the reduction of energy and resource consumption at all stages of the production process

through complex raw material processing, the use of waste materials, the widespread adoption of additive technologies, and the development of green technologies for material production and disposal [1]. In this context, lightweight concrete based on various binders and aggregates derived from plant materials (such as sawdust concrete, arbolite, fibrolite, and xylolite) is of particular interest [2]. Wood-mineral composites combine the properties of materials based on mineral binders (strength, thermal resistance, fire resistance) and vegetable raw materials

(low specific gravity, porosity, low thermal conductivity, corrosion resistance) [2, 3]. Despite the long history of obtaining and using these materials, there is still a large number of ongoing studies aimed at improving their performance by varying the binder composition (cement-based and cement-free), the content and composition of organic aggregates (wood chips, shavings, sawdust), and the introduction of additives such as mineralizers, pore-forming agents, and hydrophobizing agents [4–15]. In this regard, the investigation of the mechanisms that govern the formation of wood-mineral composite structures and their properties has significant scientific and practical importance.

There are few studies on the production of wood-mineral composite materials based on alkali-activated slag-containing binders, despite the fact that these materials have great potential for implementation in terms of resource conservation and environmental protection during their production [2, 4]. The binding agents in these materials are aluminosilicate compounds, both natural (clay) and man-made (fly ash and metallurgical slag), and the activators for the setting and hardening processes are alkaline reagents such as caustic alkalis and liquid glass [4]. The highly alkaline nature of these binders promotes better adhesion between the wood aggregate and the mineral matrix, as the solution penetrates the cell walls of the wood and leads to mineralization and hardening at the interface between the binder and wood [16, 17].

In most of the studies on the properties of composites based on alkali-activated binders, fine wood waste was used as an aggregate [16–18]. For example, a high proportion of 2.36 mm wood fibers (10–50 wt.%) mixed with a binder based on fly ash and a mixed $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ activator (2.5:1) leads to a decrease in density (1720–1300 kg/m^3), an increase in porosity and water absorption (0.5–3.5%), a decrease in compressive strength (33–5 MPa) for composite material obtained under heat treatment conditions (60 °C, 24 h) [18]. Pressing of alkali-activated mixtures containing fly ash, methakaolin (20 wt.%) and lignocellulose waste (20 wt.%) in the presence of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ activator followed by heat treatment (60–100 °C) makes it possible to obtain lightweight composite boards (1.1 kg/m^3), the characteristics of which allow us to consider such materials as replacements for chipboard and fiberboard based on organic binders [19]. It has been demonstrated in [20] that the addition of sawdust up to 6.3% to a slag-alkaline mixture (ground slag, sodium hydroxide activator 4.9–7.1%) results in a two-fold increase in flexural strength and a reduction in compressive strength compared to the control sample. This increase in strength can be attributed to the formation of an optimized reinforced microstructure in the material, which manifests itself in a reduction of cracking. An increase in the amount of sawdust used in the composite up to 10% leads to a

reduction in the strength and density of the samples (from 1.836 to 1.027 kg/m^3) and an increase in their apparent porosity by more than two times. Features of the composite's structure formation include the formation of C–S–H and C–A–S–H hydrate phases with a fibrous, needle-like, or lamellar morphology. One of the factors that contributes to the composite material's enhanced resistance to cracking is the improved adhesion of sawdust particles to the cement matrix, which is achieved by filling micropores within the sawdust using a binder. This leads to a significant reduction in thermal conductivity (from 0.553 to 0.203 $\text{W/m}\cdot\text{K}$) when the sawdust content in the material increases to 10 wt.%.

It was shown in [21] that the introduction of 10 wt.% of wood aggregate (sawdust, fiber, flour) in a slag-alkali binder (70% fly ash + 30% methakaolin, alkaline activator $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) helps to reduce the compressive strength of the composite by 2–3 times compared with the control sample. At the same time, an increase in the dispersion of the filler has a positive effect on the strength of the composite material. Adding a sufficiently large proportion of pine sawdust to calcined clay (mass ratio 3:1) using sodium liquid glass as an activator under heat treatment conditions (75 °C, 24–38 h) makes it possible to obtain a lightweight composite material (density 610–760 kg/m^3) with high flexural and compressive strength and modulus of elasticity [22]. This material is characterized by more than 3 times lower thermal conductivity compared to the control material. The possibility of manufacturing shaped products for masonry from mixtures containing fly ash, ground metallurgical slag, alkaline activator $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ and wood chips (up to 68 vol.%) is shown [23].

An analysis of the available literature has revealed that there is a lack of systematic studies on the properties of cement-free, porous wood-based mineral composite materials. In this regard, the aim of this study was to develop and investigate the properties of composite materials based on a silicate binder derived from slag, with a porous structure that has been stabilized using a finely dispersed aluminosilicate additive.

MATERIALS AND METHODS

To obtain the composite material, a slag-silicate binder was used, which included ground blast furnace slag and a hardening activator (sodium silicate solution, sodium liquid glass). Ground granular blast furnace slag ('Mechel Materials' LLC, Chelyabinsk, Russia) had a specific surface area of 550 m^2/kg and a bulk density of 1.5 g/cm^3 . The composition of the slag was determined in accordance with GOST 3476–2019, the results of determining the chemical composition are shown in Table 1. Based on the chemical composition, the slag quality coefficient is 1.57.

Table 1. Chemical composition of slag

Content of oxides (wt. %)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂
34.1	11.7	0.6	36.5	10.8	0.7	0.8	2.6	2.2

Table 2. Characteristics of the foaming agents used in the work

Foaming agent	Density, g/cm ³	pH
PB-Lux (JSC 'RHZ Nordiks', Voskresensk, Russia)	1050–1100	8–10
Etalon ('Aist' LLC, Chelyabinsk, Russia)	1120	6.5–8

A solution of sodium silicate (sodium liquid glass Na₂Ox_nSiO₂, ρ = 1.5 g/cm³) of the SNZH1 brand ('PromKeramika' LLC, Shchekino, Russia) according to GOST 13078-2021 was used for curing the composite material, it composed of 29 wt.% SiO₂ and of 10.4 wt.% Na₂O with silicate modulus $n = 2.8$.

Synthetic anionactive ('PB-Lux') and protein ('Etalon') foaming agents were used to form the porous structure of the material, the characteristics of which are given in Table 2.

The foam was prepared using a portable pneumatic foam generator IK FOAM Pro2+ from solutions with a different ratio of water and foaming agent. For the resulting foam, the multiplicity was determined by the ratio of the volume of foam and the initial solution and the stability index for liquid separation when holding the foam for 30 min. Preliminary tests have shown that the optimal foaming agent content for obtaining foam with a sufficient multiplicity is 3.5%. To increase the stability of the foam in the slag-alkali mixture, a finely dispersed gel-forming aluminosilicate additive (bentonite clay powder PIT1 according to GOST 28177-89, 'Bentholding' LLC, Moscow, Russia) with a particle size of 1–5 microns and with a content of the main clay mineral montmorillonite of at least 70 wt.% was used.

Crushed softwood according to GOST 19222-2019 ('Smolenskiy Les', Dorogobuzh, Russia) with needle-shaped or flat particles measuring 2–20 mm, with bulk density 120–140 kg/m³ and humidity 10–15% was used as aggregate in the production of wood-mineral composite material.

To determine the characteristics of the material studied in the work, samples were formed in the shape of 40×40×160 mm³ prisms and of 10×10×10 cm³ cubes. The concrete mix was prepared using a CONTROLS 65-L0006/AM laboratory mixer by sequentially loading crushed wood, ground slag, a finely dispersed additive, a sodium silicate solution and foam from a foam generator into a bowl while stirring. To determine the optimal ratio of binder and aggregate components, which can produce a composite material that meets the requirements for self-

supporting structural and thermal insulation blocks (dry density grade D600, compressive strength class B1.5), a series of samples was obtained in which the components varied in the following ranges: slag 330–440 kg/m³, crushed wood 120–160 kg/m³, the aggregate/slag ratio 0.5–0.7. The total mixing time of the concrete mixture from the moment of loading of all components was 5 min. The samples were formed by layering and final compaction of the mixtures in molds on a vibrating pad. The samples were kept in molds at a temperature of 20±2 °C and at relative humidity of at least 90% for 1 day, then removed from the molds and stored under normal laboratory conditions. Some of the samples were subjected to heat treatment by heating in a thermostat at temperatures of 80–90 °C and at relative humidity of at least 90% for 6–12 hours.

The strength characteristics of the obtained samples (compressive and flexural strength) were determined after 28 days of storage using a universal testing machine UPB 86/200 Form + Test (Germany). The tests of samples of the same composition were repeated six times, and the average strength values were calculated based on the results obtained. The determination of water absorption (by weight and volume) of a porous composite was carried out in accordance with GOST 12730.3-2020 by weighing samples in a water-saturated state. Thermal analysis (DTA + TG) of the materials was performed using an SDT Q600 (USA) thermal analyzer, the samples were heated to 1000 °C with a heating rate of 10 K/min, the air purge rate through the analyzer furnace was 100 ml/min. Heat release during binder hydration was measured using isothermal calorimetry (TAM Air 3116-2, TA Instruments, USA). The phase composition of the materials was determined by X-ray phase analysis, X-ray diffractograms were recorded using a SHIMADZU XRD 6000 (Japan) diffractometer with a copper anode ($\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$; tube voltage 40 kV, current 40 mA) in the angle range $2\theta = 5\text{--}70^\circ$ with a scanning step of 0.02°. The specific surface area of the materials was determined using the Brunauer-Emmett-Teller method using the Quantachrome NOVA 2200e (USA) device by low-temperature

nitrogen adsorption-desorption at 77 K. The thermal conductivity of the samples was measured using an ITP-MG4 (Russia) type meter in accordance with GOST 7076-99. A multifunctional scanning electron microscope JEOL JCM-6000 Plus (Japan) was used to study the morphology and structure of the samples.

RESULTS AND DISCUSSION

For the formation of a porous structure in a wood-mineral composite material, it is essential to produce foam with a controllable multiplicity. The stability of this foam must be maintained in order to ensure high dispersion and uniform distribution of air bubbles throughout the volume of the initial mixture prior to the setting of the binder. Preliminary experiments with various foam agents (Table 2) revealed that a protein-based foam agent in an alkaline sodium silicate environment produces a less stable foam with lower multiplicity than a synthetic foam agent. Therefore, further optimization of the component ratios for foam generation was performed using a synthetic foam agent. Figure 1 illustrates the results of determining the foam multiplicity and amount of separated liquid based on the composition of the initial foam mixture.

It can be seen from the data presented (Fig. 1) that the inclusion of sodium silicate and bentonite into the foaming mixture has various effects on the properties of the resulting foam. While the foam multiplicity appears to be largely unaffected by the presence of either additive at concentrations up to 4% (Fig. 1a), the water separation during foam stratification is significantly reduced in the presence of bentonite over an extended period of time (Fig. 1b). This stabilizing effect is attributed to the

sorption of bentonite particles at the air-liquid interface, which hinders the coalescence of individual bubbles and prolongs the duration of the foam's stable state. Increasing the bentonite concentration (above 4%) further enhances foam stabilization, although it also leads to a decrease in foam multiplicity (Fig. 1a). Therefore, the addition of bentonite at a concentration of 4% to the liquid phase is sufficient to produce a foam with the highest degree of multiplicity and stability during the formation of the porous structure of the composite material.

Important factors determining the technological characteristics of a concrete mix are workability, density, delamination, and the start and end time of setting of the binder. For the slag-silicate binder used in the work, the parameters were determined to achieve the required strength class of the stone to obtain a composite material (Table 3).

Rather short setting times combined with high strength are characteristic of cement-free slag-alkali binders [2], which is explained by the intense interaction of the alkaline activator with amorphous (glass phase) slag components to form a dense polymerized aluminosilicate matrix (the so-called 'geopolymer concrete'). To determine the effect of foam injection on the interaction between the binder components, the kinetics of heat release in a slag-alkali mixture of a given composition was studied (Table 3) in the presence of foaming agent and bentonite using isothermal calorimetry. According to the temperature measurements of the control mixture (without foaming agent) and a mixture containing 0.35% of the foaming solution based on the mass of slag, the dependences of the heat flux on the reaction time (up to 240 h) are shown in Fig. 2.

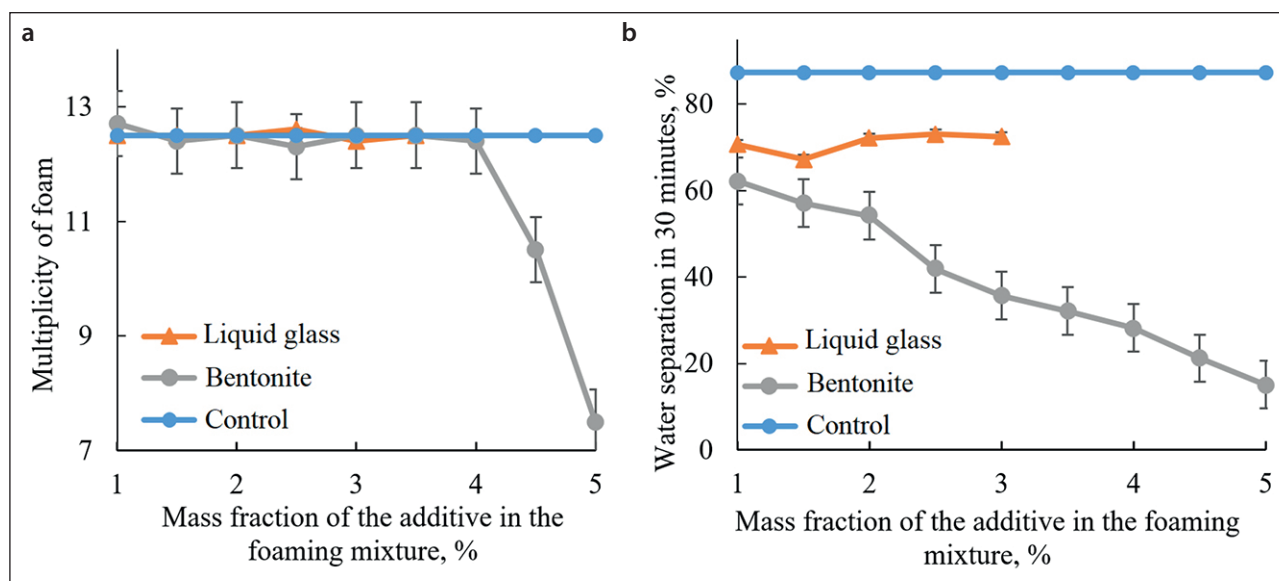
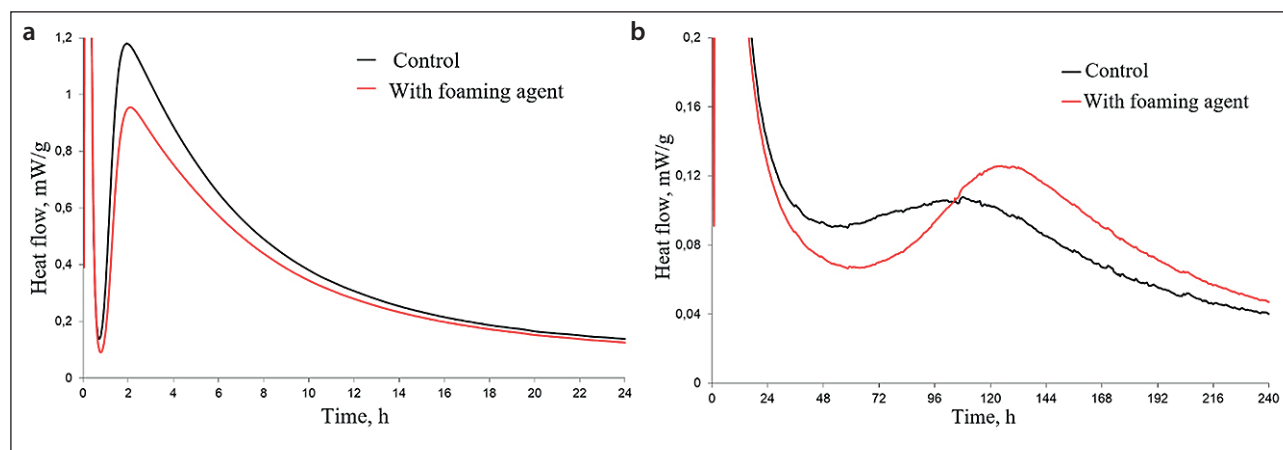


Fig. 1. The effect of the presence of liquid glass and bentonite in a foaming solution (PB-Lux foaming agent) on (a) the multiplicity and (b) the stability of the foam

Table 3. Composition and characteristics of the slag-silicate binder

Liquid glass/slag ratio	Setting time, min		Normal density, %	Strength grade
	Start	End		
0.7	30	50	46	M300

**Fig. 2.** The dependences of the heat flow on the exposure time of the slag-silicate mixture in the presence and absence of a foaming agent at (a) the initial and (b) the final stage of the formation of the structure of the slag-silicate stone

It follows from the calorimetry results (Fig. 2) that several periods of heat release are observed for the control sample of the mixture and the sample with the foaming agent. The initial period with a maximum at a time of ~ 10 min is typical for both samples, the magnitude of the heat flux practically does not depend on their composition. The second period with a maximum heat release after about 2 h is characterized by a lower thermal effect for the sample with a foaming agent, which can be explained by the sorption of surfactants on the surface of slag particles and the associated slowdown in the formation of products in the hardened material (Fig. 2a). With an increase in the duration of interaction in the slag-silicate system, a shift in the maximum heat release in the case of a porous sample (by ~ 18 h) and its narrowing on the time scale compared with the control sample is observed (Fig. 2b). This effect is also explained by the inhibition of the processes of structure formation in a solid material, which are diffusive in nature. Nevertheless, the sum of the heat fluxes in the entire studied range of structure formation for both samples practically coincides and amounts to about 105 J/g. Consequently, foaming of the slag silicate mixture does not significantly change the intensity of hydration processes, especially in the early stages of hardening.

It is known that slag-alkali binders quickly set and gain brand strength during heat treatment [2, 20]. To determine the effect of temperature on the phase composition of the products formed during the curing of the binder,

two series of experiments were performed when samples were heated at 80 and 90 °C and at relative humidity of at least 90% for 6–12 h. The obtained X-ray diffraction data were compared with those for samples that hardened under normal conditions for 1 and 28 days. A typical X-ray diffraction pattern of a slag stone is shown in Fig. 3.

From XRD results (Fig. 3), the main crystalline phases formed during hardening, both under normal conditions and upon heating, are okermanite (calcium-magnesium silicate) and calcite, the total content of which does not exceed 10 wt.%. The predominant component (up to 90%) in slag silicate stone is an amorphous phase. Calcite is formed due to carbonation of an alkali-containing material, calcium-magnesium silicate is formed due to the interaction of liquid glass with slag components. Obviously, the temperature conditions of the hardening of the material are insufficient for the crystallization of silicates prone to amorphization in the system. Thus, heat treatment of slag silicate stone does not lead to a significant change in the composition of crystalline products and an increase in their proportion in the material.

Due to the predominantly X-ray amorphous structure of the interaction products in the slag-liquid glass system, the composition of the products formed when wood was introduced into the system was evaluated using thermal analysis. The sample for analysis had the following initial composition: slag 385 kg/m³, crushed wood 138 kg/m³, liquid glass solution 270 kg/m³, foaming agent 1.35 kg/m³, bentonite 1.54 kg/m³. Average weight loss when heated

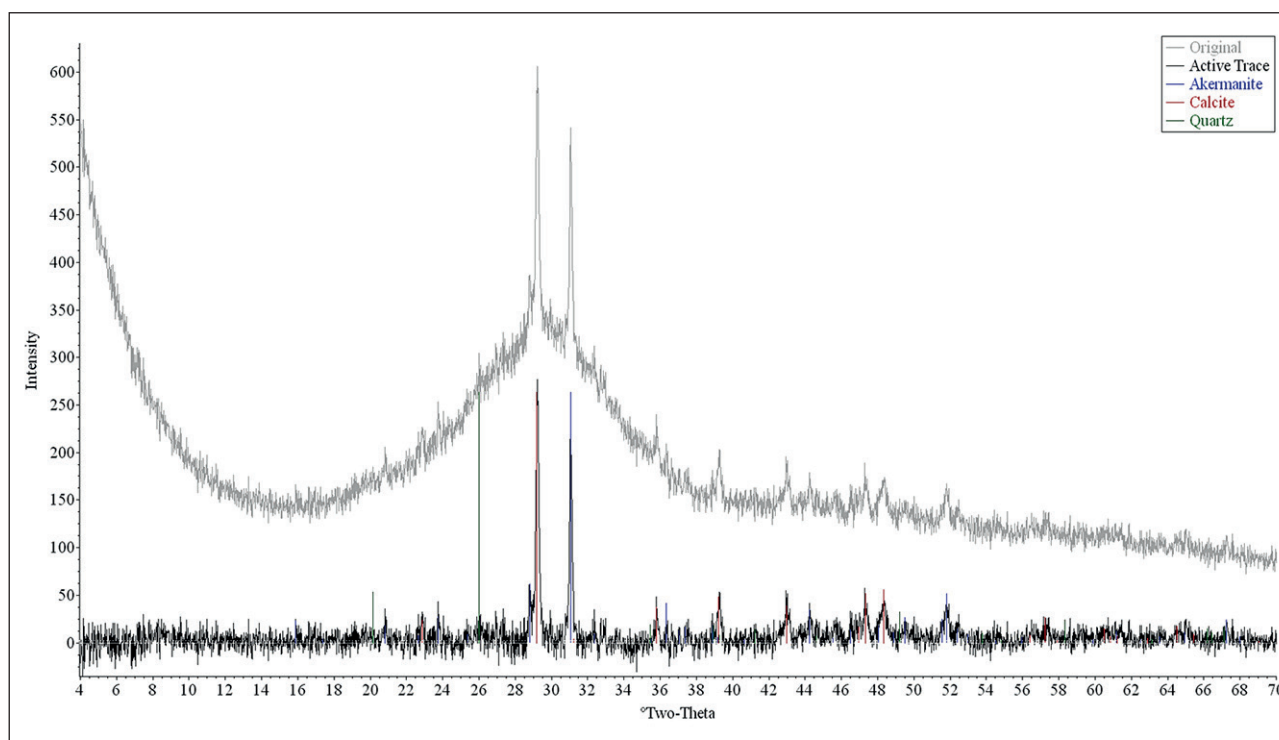


Fig. 3. XRD pattern of a sample of slag-silicate stone (liquid glass/slag ratio 0.7) subjected to heat treatment at 90 °C for 10 h.

to 1000 °C for samples obtained under normal hardening conditions is 15%, after heat treatment – 10%. Typical TG-DTG curves of linear heating of samples are shown in Fig. 4.

The TG curves of the material are characterized by four main stages of weight loss and their corresponding endothermic effects in the temperature ranges 75–150, 225–375, 450–650 and 720–830 °C. In the temperature range of 75–150 °C, weakly bound water (capillary, sorption, interlayer) is removed from sodium hydrosilicates $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. When the temperature rises to 225–375 °C, a decrease in the mass of the samples occurs due to the dehydration of calcium hydrosilicates such as tobermorite. A weakly expressed broad endothermic effect in a wide temperature range of 450–650 °C reflects the thermal decomposition (charring) of wood in the material. In parallel, complete dehydration of tobermorite and gyrolite, as well as decomposition of residual portlandite, occurs at these temperatures. The effects caused by the presence of these phases are more pronounced on the thermograms of samples with long periods of hardening. An increase in temperature to 720–830 °C is accompanied by the decomposition of calcite CaCO_3 , the presence of which in the samples is confirmed by XRD data (Fig. 3), as well as calcium and sodium hydroaluminosilicates. The presence of calcite is explained by carbonization of lime and calcium hydrosilicates. Thus, the thermal analysis data show a high degree of transformation during the

interaction of the binder components, since the greatest mass loss occurs at $T > 150$ °C due to the decomposition of complex hydrate phases. The increase in decomposition temperatures of the wood aggregate is due to the mineralizing effect of the alkali-silicate components of the binder.

The features of the pores and the structure of the contact zone between the aggregate particles and the mineral matrix were studied using electron microscopy (Fig. 5).

Microscopy data shows that the material is characterized by closed-type pores, which are predominantly spherical in shape and have dimensions of the order of 1 mm or less (Fig. 5a). The pore walls are solid and have a thickness of the order of tens of micrometers (Fig. 5b). The products of the interaction of the binder components differ in morphology; the bulk particles of lamellar and prismatic shapes are calcium hydrosilicates with colloidal bentonite particles deposited on their surface (Fig. 5c). A special feature of the contact zone at the boundary of wood particles and the mineral matrix is its dense and relatively homogeneous structure (Fig. 5d). The surface of the wood particles due to the mineralizing effect of the sealer is also covered with the products of the interaction of the binder components, which are also observed in the mineral matrix of the material. The mineralizing effect of liquid glass has a positive effect on the stabilization of the properties of wood aggregate and its thermal stability, which is consistent with the results of thermal analysis (Fig. 4). In addition, the hydrolytic effect of the alkaline

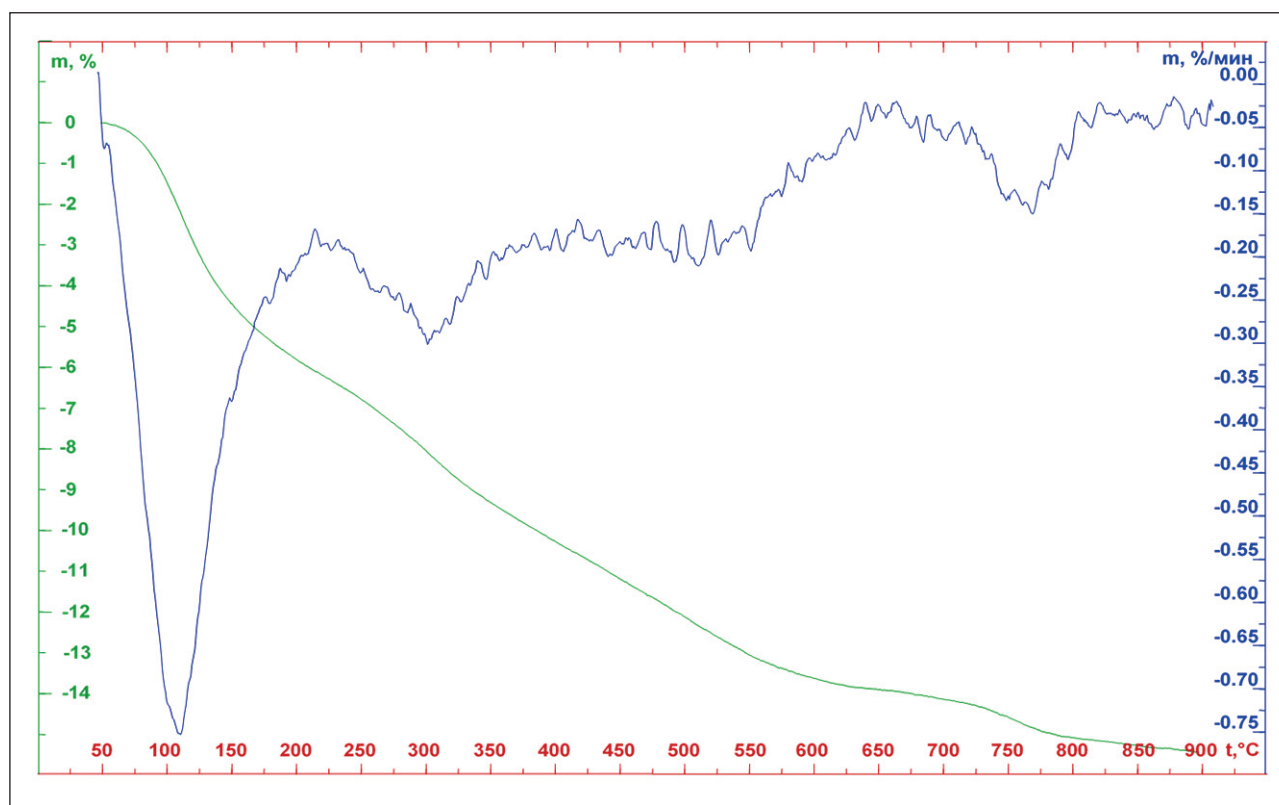


Fig. 4. TG (green) and DTG (blue) curves obtained by linear heating of a porous wood-mineral composite sample after 28 days of its hardening under normal laboratory conditions

binder medium on the wood components contributes to the formation of a more dense contact with the mineral matrix (Fig. 5d).

From the point of view of practical application, the most important characteristics for a porous wood-mineral composite material are strength, porosity, water absorption and thermal conductivity. To determine the nature of the effect of the ratio of the initial components on the compressive strength of the material, a series of samples was obtained under normal hardening conditions. The weights of the raw materials and the strength values are given in Table 4.

The research results have shown that the compressive strength and density of the composite are more correlated with the proportion of slag in the initial mixture. The dependence of strength characteristics on the content of crushed wood in the material is less pronounced. For example, the proportion of wood in sample No. 3 is the largest (wood/slag ratio 0.43) among all the presented variants, while compressive strength takes an intermediate value (Table 4). Samples No. 4 and 6 with high strength contain average amounts of wood, sample No. 7 with a low proportion of wood (wood/slag ratio 0.3) has the lowest strength. The amount of hardening agent can vary within narrow limits: with a liquid glass/slag ratio of 0.5 or less, the mixture is characterized by low workability

and the resulting material has a heterogeneous structure; with a ratio greater than 0.7, separation of the liquid and stratification of the sample are observed. The most reproducible characteristics of material samples with uniform porosity are obtained with an optimal liquid glass/slag ratio of 0.7.

Heat treatment of the composite material leads to a regular increase in its strength. Figure 6 shows the results of measuring the compressive strength of samples of composition No. 3 with the largest proportion of wood (Table 4) after their isothermal heating at 80 and 90 °C with different durations.

An increase in the strength of the material during heat treatment (Fig. 6) occurs due to an increase in the depth of interaction of the components of the slag silicate binder, to an increase in the binding strength of wood particles with the mineral matrix, and to the reinforcing function of the aggregate. A comparison of the data in Fig. 6 and Table 4 shows that during heat treatment, an increase in the strength of the material can be achieved by 15–20% compared with the samples obtained under normal hardening conditions. Heat treatment at 90 °C during 8–10 h is sufficient to achieve the highest strength, an increase in the heating time is impractical (Fig. 6). The use of lower temperatures reduces the efficiency of the material production process by increasing the heating

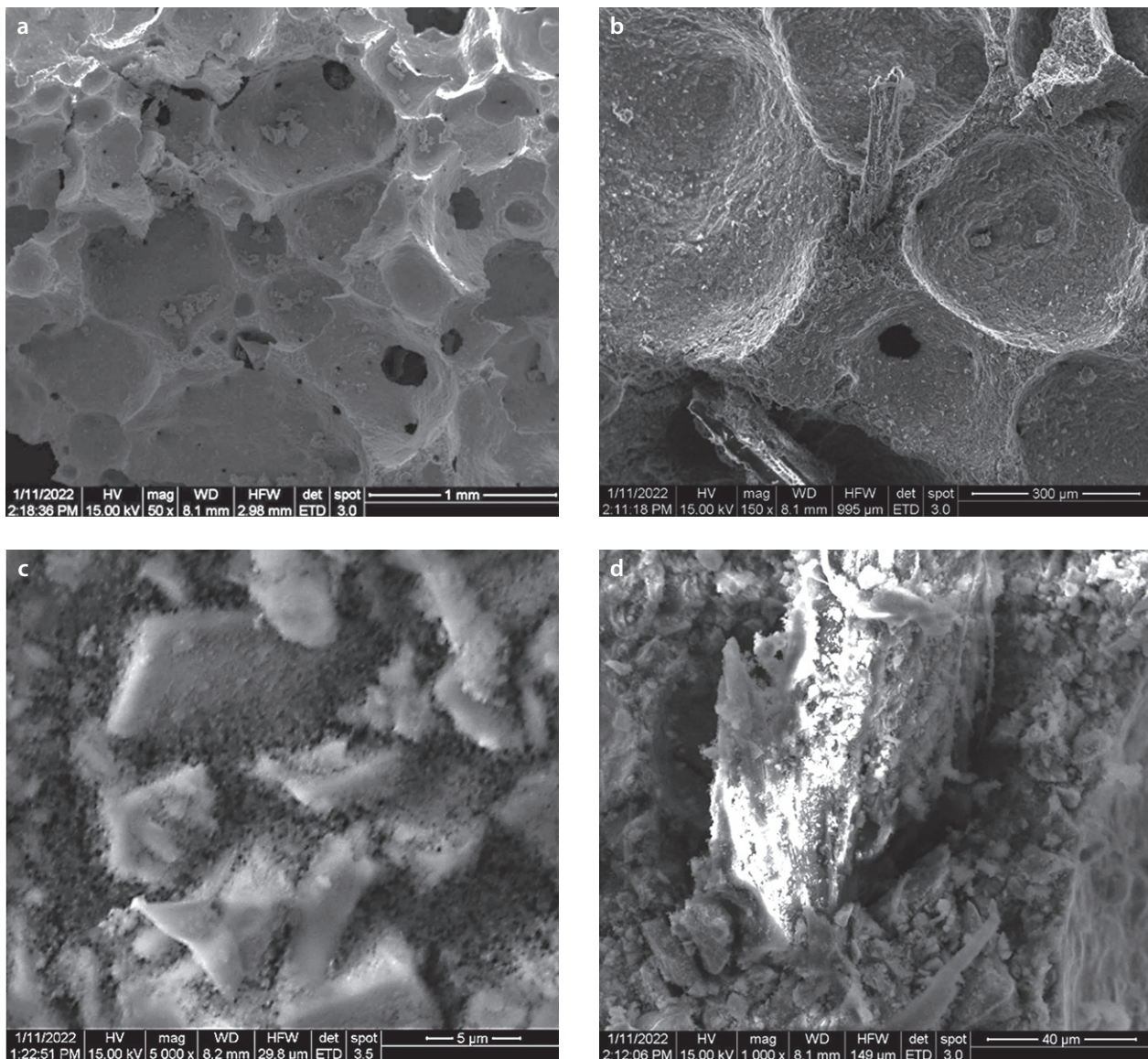


Fig. 5. Micrographs of cross-section of a porous wood-mineral composite based on a slag silicate binder aged 28 days during hardening under normal conditions: (a) pores of various diameters; (b) distribution of pores and wood in the volume of the material; (c) hydroaluminosilicate distributed among slag particles; (d) the contact zone of wood with mineral the matrix

time, temperatures above 90 °C lead to increased removal of water, contribute to the destruction and softening of the material.

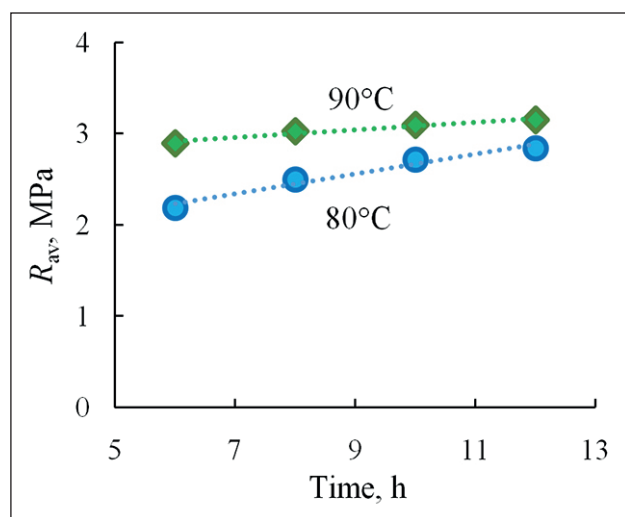
The water absorption of a wood-mineral composite is directly related to its porosity and can significantly reduce the strength of the material, primarily due to the swelling of wood particles and the associated softening of the material. To assess water absorption, samples with average binder and aggregate contents were weighed (sample No. 9, Table 4) in the initial mixture, and then were hardened under normal conditions for 28 days. Based on the results of determining the compressive strength of samples in a water-saturated state, the softening coefficient of the

material was calculated as the ratio of the strengths of wet and dry samples. The results of the water absorption determination are shown in Table 5.

It follows from the characteristics of water absorption that the resulting composite material has low water resistance, and in a humid environment, the strength and frost resistance of such a material will decrease significantly. In addition to penetrating into the open pores, water is absorbed by wood particles, which, due to swelling, will also cause softening of the material. In fact, the observed trend is typical for all porous and wood-containing materials, therefore, such materials are recommended to be used in conditions of low humidity or to protect them

Table 4. The content of raw materials for obtaining a porous composite material and its characteristics at the age of 28 days (hardening under normal conditions, liquid glass/slag ratio 0.7)

Sample	Slag, kg/m ³	Crushed wood, kg/m ³	Foaming agent, kg/m ³	Bentonite, kg/m ³	Dry density, kg/m ³	Compressive strength R_{av} , MPa
1	347	124	1.21	1.38	552	1.38
2	424	124	1.48	1.69	640	2.78
3	347	152	1.21	1.38	575	2.38
4	424	152	1.48	1.69	668	3.33
5	331	138	1.16	1.32	546	1.40
6	439	138	1.54	1.75	680	3.65
7	385	118	1.35	1.54	593	1.34
8	385	158	1.35	1.54	627	1.75
9	385	138	1.35	1.54	607	1.50

**Fig. 6.** Dependence of compressive strength (R_{av}) of wood-mineral composite samples (composition No. 3, Table 4) on the duration of their isothermal heating at different temperatures (relative humidity of at least 90%)**Table 5.** Water absorption of porous wood-mineral composite material

Indicator	Value
Water absorption by weight W_m , %	74
Water absorption by volume W_v , %	45
Softening coefficient K_s	0.63

from moisture (surface hydrophobization, impregnation with special compounds).

Measurements of thermal conductivity of porous composite material samples with average values of density and strength (compositions Nos. 3, 8, 9; Table 4) showed

that the average value of thermal conductivity is about 0.08 W/(m·K). The obtained values of thermal conductivity are close to those for arbolite based on Portland cement, and they are significantly lower than those for foam and aerated concrete, which confirms the good thermal insulation properties of the material.

CONCLUSION

1. The possibility of producing a porous composite wood-mineral material, analogous to arbolite, based on a slag-silicate binder, wood aggregate, synthetic foaming agent, and fine aluminosilicate foam stabilizer (bentonite), has been experimentally confirmed. By varying the content of raw materials, consisting of 330–440 kg/m³ blast furnace slag and 125–160 kg/m³ wood, at optimal ratios of liquid glass to slag 0.7 and foaming agent mixture to slag 0.0035 (composed of 3.5% foaming agent and 4% bentonite), it is possible to produce a composite material with following characteristics: density 550–680 kg/m³, compressive strength 1.35–3.65 MPa, an open porosity 45–50%, and an average thermal conductivity 0.08 W/(m·K). It is shown that the heat and humidity treatment of the composite at 80–90 °C for 10–12 h helps to gain strength, which, with normal hardening, is achieved within 28 days.

2. Stabilization of the homogeneous porous structure of the resulting composite material (spherical pore sizes less than 1 mm) is achieved by introducing a fine gel-forming additive (bentonite) with particle sizes of 1–5 μm into the foaming mixture. Bentonite particles are distributed in the walls of foam bubbles, reduce their ability to coalesce and strengthen the pore walls in the mineral binder matrix during setting due to gelation.

3. During setting and hardening of the slag-silicate binder, mainly amorphous products (hydrosilicates and hydroaluminosilicates of calcium and sodium) are formed, the proportion of crystalline products (calcite, okermanite) does not exceed 10%. The hydrolytic effect

of the alkaline binder medium on the wood components contributes to the formation of a more dense contact with the mineral matrix. The contact zone of the slag-silicate matrix with wood particles has a dense homogeneous structure, it contains calcium hydroaluminosilicate particles in the form of petals, which are formed in areas

of accumulation of colloidal bentonite particles at the interface of the contacting phases.

4. The porous wood-mineral composite material obtained in the work can be used for the production of light-weight non-load-bearing structural elements, as a noise and thermal insulation material.

REFERENCES

1. Miraldo S., Lopes S., Pacheco-Torgal F., Lopes A. Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. *Construction and Building Materials*. 2021: 298:123729(1-26). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729>
2. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. From Portland cement to alkali-activated system: advances in wood-cement composites for sustainable building applications. *Cleaner Materials*. 2026:19:100365(1-44). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100365>
3. Bouguerra A., Ledhem A., de Barquin F., Dheilily R.M., Quéneudec M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*. 1998:28(8):1179–1190. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00075-1)
4. Sarmin S.N., Welling J., Krause A., Shalhafan A. Investigating the possibility of geopolymers to produce inorganic-bonded wood composites for multifunctional construction material – A Review. *BioResources*. 2014:9(4):7941–7950.
5. Bouguerra A., Amiri O., Ait-Mokhtar A., Diop M. Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*. 2002:54:103–112. <https://doi.org/10.1680/mac.2002.54.2.103>
6. Siddique R. Properties of concrete incorporating high volumes of class f fly ash and san fibers. *Cement and Concrete Research*. 2004:34(1):37–42. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00192-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00192-3)
7. Jauberthie R., Rendell F., Tamba S., Cissé I.K. Properties of cement-rice husk mixture. *Construction and Building Materials*. 2003:17(4):239–243. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(03)00005-9)
8. Yagubkin A., Shabanov D., Niyakovskii A., Romanovski V. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption. *Biomass Conv. Bioref.* 2025:15:13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>
9. Abdulwahid, M.Y., Akinwande, A.A., Kamarou, M., Romanovski V., Al-Qasem I.A. The production of environmentally friendly building materials out of recycling walnut shell waste: a brief review. *Biomass Conv. Bioref.* 2024: 4:24963–24972. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04760-2>
10. Muñoz S., Villena L., Tesen F., Coronel Y., Garcia J., Brast C. Influence of coconut fiber on mortar properties in masonry walls. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2023:23:52–58. <https://doi.org/10.56748/ejse.23391>
11. Cabanillas Hernandez G., García Chumacero J.M., Villegas Granados L.M., Arriola Carrasco G. G., Marín Bardales N. H. Sustainable use of wood sawdust as a replacement for fine aggregate to improve the properties of concrete: a Peruvian case study. *Innov. Infrastruct. Solut.* 2024:9:233. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01567-6>
12. Koohestani B., Koubaa A., Belem T., Bussièrè B., Bouzahzah H. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials*. 2016:121:222–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118>
13. Quiroga A., Marzocchi V., Rintoul I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of populus euroamericana wood fibers. *Composites Part B: Engineering*. 2016:84:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>
14. Bederina M., Laidoudi B., Goullieux A., Khenfer M.M., Bali A., Quéneudec M. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*. 2009:23(3):1311–1315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029>
15. Govin A., Peschard A., Guyonnet R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites*. 2006:28(1):12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>
16. Ye H., Asante B., Schmidt G., Krause A., Zhang Y., Yu Z. Eco-friendly geopolymer-wood building materials: Interactions between geopolymer and wood cell wall. *Journal of Cleaner Production*. 2023:420:138381(1-10). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138381>

17. Ye H., Zhang Y., Yu Z., Mu J. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2018:173:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.028>
18. Al Bakri Abdullah M.M., Izzat A.M., Muhammad Faheem M.T., Kamarudin H., Khairul Nizar I., Bnhusain M., Rafiza A.R., Zarina Y., Liyana J. Feasibility of producing wood fibre-reinforced geopolymer composites (WFRGC). *Advanced Materials Research*. 2012:626:918–925. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.626.918>
19. Olayiwola H.O., Amiandamhen S.O., Meincken M., Tyhoda L. Investigating the suitability of fly ash/metakaolin-based geopolymers reinforced with south african alien invasive wood and sugarcane bagasse residues for use in outdoor conditions. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021:79(3):611–627. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01636-4>
20. Kielė A., Vaičiukynienė D., Tamošaitis G., Pupeikis D., Bistrickaitė R. Wood shavings and alkali-activated slag bio-composite. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020:78(3):513–522. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01516-x>
21. Sarmin S.N. The influence of different wood aggregates on the properties of geopolymer composites. *Key Engineering Materials*. 2016:723:74–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.723.74>
22. Berzins A., Morozovs A., Gross U., Iejavs J. Mechanical properties of wood-geopolymer composite. *Proc. 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, 24.-26.05.2017 Jelgava, Latvia. 1167-1173. <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N251>
23. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. Characterisation of a novel sustainable wood-geopolymer masonry units. *Developments in the Built Environment*. 2024:20:100540(1-13). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100540>

ADDITIONAL INFORMATION

The authors state that neither generative artificial intelligence nor artificial intelligence-based technologies were used in the preparation of this article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana S. Samchenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Institute of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

Andrey V. Korshunov – Dr Sci. (Chem.), Professor, Professor of the Department of Building Materials Science, Institute of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, korshunov@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7585-0953>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors made an equal contribution to the preparation of this article.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 03.04.2026; accepted for publication 09.04.2026.

Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой

Светлана Васильевна Самченко , Андрей Владимирович Коршунов* 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Расширение перечня вяжущих, заполнителей и наполнителей, функциональных добавок и модификаторов структуры бетонов и композитов позволяет в настоящее время получать инновационные материалы с улучшенными механическими, физическими и физико-химическими характеристиками. Представляют интерес легкие конструкционные и функциональные материалы на основе вяжущих различной природы с заполнителями из растительного сырья (опилкобетон, арболит, фибролит, ксилолит и др.). Целью работы являлось получение и исследование свойств бесцементного древесно-минерального композиционного материала с пористой структурой, стабилизированной с использованием высокодисперсной алюмосиликатной добавки. **Материалы и методы.** В работе использовали бесцементное шлакосиликатное вяжущее, включающее молотый доменный шлак и активатор твердения – раствор силиката натрия (натриевое жидкое стекло). Для формирования пористой структуры материала применяли синтетический пенообразователь с высокодисперсной добавкой (бентонит). В качестве заполнителя использовали дробленку хвойных пород. Была получена серия образцов, в которых варьировали компоненты в следующих интервалах: шлак 330–440 кг/м³, древесная дробленка 120–160 кг/м³, отношение затворитель/шлак 0,5–0,7. Часть образцов подвергали термической обработке путем нагрева в термостате при температурах 80–90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч. Образцы изучали с использованием методов механических испытаний, термогравиметрии, РФА, определяли пористость, теплопроводность. **Результаты.** В работе получен бесцементный пористый древесно-минеральный композиционный материал (аналог арболита). Показано, что введение в смесь молотого доменного шлака (330–440 кг/м³) и древесины (125–160 кг/м³) при оптимальных соотношениях жидкое стекло/шлак 0,7 и пенообразующая смесь/шлак 0,0035 (3,5% пенообразователя + 4% бентонита) позволяет получить композиционный материал плотностью 550–680 кг/м³, прочностью при сжатии 1,35–3,65 МПа, открытой пористостью 45–50%, средней теплопроводностью 0,08 Вт/(м·К). Тепловлажностная обработка композита при 80–90 °С способствует достижению марочной прочности в течение 10–12 ч. Присутствие в пенообразующей смеси ультрадисперсной гелеобразующей добавки (бентонит) с размерами частиц 1–5 мкм способствует стабилизации однородной пористой структуры композиционного материала (размеры сфероидных пор менее 1 мм). **Заключение.** Полученный в работе пористый древесно-минеральный композиционный материал может быть использован для производства легких несущих конструктивных элементов, в качестве шумо- и теплоизоляционного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: древесно-минеральный пористый композит, шлакосиликатное вяжущее, высокодисперсный стабилизатор структуры, тепловлажностная обработка, прочность, водопоглощение, теплопроводность

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Самченко С.В., Коршунов А.В. Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive

Svetlana V. Samchenko , Andrey V. Korshunov* 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: korshunovav@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The extension of the range of binders, aggregates, and fillers as well as functional additives and structural modifiers for concrete and composite materials currently allows for the production of innovative materials with enhanced mechanical, physical, and physico-chemical properties. Lightweight structural and functional materials derived from binders of different natures with fillers derived from vegetable raw materials, such as sawdust concrete, arbolite, fibrolite, or xylolite, are of particular interest. The aim of this research was to develop and investigate the properties of a wood-mineral cement-free composite material with a porous structure that has been stabilized using a finely dispersed aluminosilicate additive. **Materials and methods of research.** A cement-free slag-based silicate binder was utilized in the study, comprising ground blast furnace slag and a curing agent – a solution of sodium silicate (sodium liquid glass). A synthetic foam-forming agent with a finely dispersed additive (bentonite) was employed to create the porous structure of the material. Crushed softwood was used as an aggregate. A range of samples were produced, varying the composition within the following parameters: slag 330–440 kg/m³, crushed wood 120–160 kg/m³, and solution-to-slag ratio 0.5–0.7. Several samples were subjected to thermal treatment by heating in a temperature-controlled environment at 80–90 °C and at humidity of at least 90% for 6–12 hours. Samples were examined using mechanical testing methods, thermogravimetric analysis, X-ray diffractometry, porometry, and thermal conductivity measurements. **Results and Discussion.** A cement-free porous wood-mineral composite material (an analogue of arbolite) was obtained. It is shown that the introduction of ground blast furnace slag (330–440 kg/m³) and crushed softwood (125–160 kg/m³) into the mixture at optimal ratios of liquid glass/slag 0.7 and foaming mixture/slag 0.0035 (3.5% foaming agent + 4% bentonite) makes it possible to obtain a composite material with a density of 550–680 kg/m³, compressive strength of 1.35–3.65 MPa, an open porosity of 45–50%, and an average thermal conductivity of 0.08 W/(m·K). The heat and humidity treatment of the composite at 80–90 °C contributes to the achievement of ultimate strength within 10–12 h. The presence of a finely gel-forming additive (bentonite) with particle sizes of 1–5 μm in the foaming mixture helps to stabilize the homogeneous porous structure of the composite material (spherical pore sizes less than 1 mm).

Conclusion. The porous wood-mineral composite material obtained in the work can be used for the production of lightweight non-load-bearing structural elements, as a noise and thermal insulation material.

KEYWORDS: wood-mineral porous composite, slag-silicate binder, finely dispersed structure stabilizer, heat and moisture treatment, strength, water absorption, thermal conductivity

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Samchenko S.V., Korshunov A.V. Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

ВВЕДЕНИЕ

Бетоны являются универсальными строительными материалами с широким спектром возможностей варьирования состава, структуры и областей практического использования. Расширение перечня вяжущих, заполнителей и наполнителей, функциональных добавок и модификаторов структуры позволяет в настоящее время получать инновационные материалы с улучшенными механическими, физическими и физико-химическими характеристика-

ми [1, 2]. Актуальным направлением в индустрии строительных материалов является снижение энерго- и ресурсоемкости на всех этапах производства за счет комплексной переработки сырья, использования техногенных отходов, широкого внедрения аддитивных технологий, экологизации технологий получения и утилизации материалов [1]. В этом отношении представляет интерес особый класс легких бетонов на основе вяжущих различной природы с заполнителями из растительного сырья (опилкобетон, арболит, фибролит, ксилолит и др.) [2]. Древесно-

минеральные композиты совмещают в себе свойства материалов на основе минеральных вяжущих (прочность, термическая стойкость, огнестойкость) и растительного сырья (низкий удельный вес, пористость, низкая теплопроводность, коррозионная стойкость) [2, 3]. Несмотря на продолжительный опыт получения и применения таких материалов, до сих пор проводится большое число исследований, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик путем варьирования состава вяжущего (цементные и бescементные вяжущие), содержания, состава и структуры органического заполнителя (древесная дробленка, стружка, опилки, щепа, костра, лузга), введения добавок (минерализаторы, порообразователи, гидрофобизаторы [4–15]). В связи с этим изучение закономерностей формирования структуры древесно-минеральных композитов и их свойств представляет несомненный научный и прикладной интерес.

Исследования по получению древесно-минеральных композиционных материалов на основе щелочно-активированных шлако содержащих вяжущих немногочисленны, хотя такие материалы имеют большие перспективы внедрения с позиции ресурсосбережения и экологизации при их производстве [2, 4]. Вяжущей основой в таких материалах выступают алюмосиликатные соединения природного (глины) и техногенного (зола-унос, металлургические шлаки) происхождения, активаторами процесса схватывания и отвердевания являются щелочные реагенты (едкие щелочи, жидкое стекло, щелочные плавы) [4]. Сильнощелочная среда таких вяжущих способствует лучшей адгезии древесного заполнителя к минеральной матрице за счет проникновения раствора через клеточные стенки древесины, минерализации и упрочнения на границе контакта вяжущее/древесина [16, 17].

В большей части работ по изучению свойств композитов на основе щелочно-активированных вяжущих в качестве заполнителя использованы мелкодисперсные древесные отходы [16–18]. Например, высокая доля древесных волокон размерами ~2,36 мм (10–50 мас.%) в смеси с вяжущим на основе золы уноса и смешанного активатора $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ (2,5:1) приводит к снижению плотности (1720–1300 кг/м³), увеличению пористости и водопоглощения (0,5–3,5%), снижению прочности при сжатии (33–5 МПа) получаемого в условиях термической обработки (60 °С, 24 ч) композиционного материала [18]. Прессование щелочно-активированных смесей, содержащих золу уноса, метакаолин (20 мас.%) и лигноцеллюлозных отходов (20 мас.%) в присутствии активатора $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ с последующей термообработкой (60–100 °С) позволяет получать легкие композитные плиты (1,1 кг/м³), характери-

стики которых позволяют рассматривать такие материалы как замену древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит на органической связке [19]. В работе [20] показано, что введение опилок хвойных пород до 6,3 мас.% в шлакощелочную смесь (молотый шлак, активатор NaOH 4,9–7,1 мас.%) приводит к двукратному возрастанию прочности при изгибе и снижению прочности при сжатии по сравнению с контрольным образцом. Причиной повышения прочности является формирование оптимальной армированной микроструктуры материала, выражающееся в понижении трещинообразования. Увеличение доли опилок в составе композита до 10 мас.% приводит к понижению прочности и плотности (от 1836 до 1027 кг/м³) образцов, повышению их открытой пористости более чем в 2 раза. Особенностями формирования структуры композита является образование С–S–Н и С–А–S–Н гидратных фаз с волокнистой, игольчатой и пластинчатой морфологией. Одним из факторов, повышающих устойчивость композита к трещинообразованию, является повышение адгезии опилок к цементной матрице за счет заполнения вяжущим микропор в опилках. Характерной особенностью материала является существенное понижение теплопроводности (от 0,553 до 0,203 Вт/м·К) при увеличении содержания опилок до 10 мас.%.

В работе [21] показано, что введение 10 мас.% древесного заполнителя (опилки, волокно, мука) в шлакощелочное вяжущее (70% золы уноса + 30% метакаолина, щелочной активатор $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) способствует снижению прочности композита при сжатии в 2–3 раза по сравнению с контрольным образцом. При этом повышение дисперсности заполнителя положительно сказывается на прочности композиционного материала. Добавление достаточно большой доли сосновых опилок к прокаленной глине (массовое отношение 3:1) с использованием натриевого жидкого стекла в качестве активатора в условиях термической обработки (75 °С, 24–38 ч) позволяет получить легкий композиционный материал (плотность 610–760 кг/м³) с высокими значениями прочности при изгибе и сжатии и модуля упругости [22]. Такой материал характеризуется более чем в 3 раза низкой теплопроводностью по сравнению с контрольным материалом. Показана возможность производства фасонных изделий для кладки из смесей, содержащих золу-унос, молотый металлургический шлак, щелочной активатор $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ и древесную щепу (до 68 об.%) [23].

Анализ литературных данных показал, что систематические исследования свойств бescементных пористых древесно-минеральных композиционных материалов практически отсутствуют. В связи с этим целью работы являлось получение и исследование

свойств композитов на основе шлакосиликатного вяжущего с пористой структурой, стабилизированной с использованием высокодисперсной алюмосиликатной добавки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения композиционного материала использовали шлакосиликатное вяжущее, в состав которого входил молотый доменный шлак и активатор твердения (раствор силиката натрия, натриевое жидкое стекло). Молотый гранулированный доменный шлак (ООО «Мечел-материалы», Челябинск, РФ) имел площадь удельной поверхности $550 \text{ м}^2/\text{кг}$ и насыпную плотность $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$. Состав шлака определяли в соответствии с ГОСТ 3476-2019, результаты определения химического состава приведены в таблице 1. Исходя из химического состава коэффициент качества шлака равен 1,57.

Раствор силиката натрия (натриевое жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, $\rho = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$) марки СНЖ1 (ООО «ПромКерамика», Щекино, РФ) по ГОСТ 13078-2021, использованный для отверждения композиционного материала, содержал 29 мас.% SiO_2 и 10,4 мас.% Na_2O , силикатный модуль $n = 2,8$.

Для формирования пористой структуры материала применяли синтетический анионоактивный («ПБ-Люкс») и белковый («Эталон») пенообразователи, характеристики которых приведены в таблице 2.

Пену готовили с использованием портативного пневматического пеногенератора ИК FOAM Pro 2+ из растворов с различным соотношением воды и пенообразователя. Для полученной пены определяли кратность по соотношению объемов пены и исходного раствора и показатель устойчивости по отделению жидкости при выдерживании пены в течение 30 мин. Предварительные испытания показали, что оптимальное содержание пенообразователя для получения пены с достаточной кратностью составляет 3,5%. Для повышения устойчивости пены в составе шлакощелочной смеси использовали высокодис-

персную гелеобразующую алюмосиликатную добавку (глинопорошок бентонитовый П1Т1 по ГОСТ 28177-89, ООО «Бентохолдинг», Москва, РФ) с размером частиц 1–5 мкм и с содержанием основного глинистого минерала монтмориллонита не менее 70 мас.%.

В качестве заполнителя при получении древесно-минерального композиционного материала использовали дробленку хвойных пород по ГОСТ 19222-2019 (ТПК «Смоленский лес», Дорогобуж, РФ) с игольчатыми или плоскими частицами размерами 2–20 мм, насыпной плотностью 120–140 кг/м³ и влажностью 10–15%.

Для определения характеристик изучаемого в работе материала изготавливали образцы в виде призм размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}^3$ и кубов с размером стороны 100 мм. Бетонную смесь готовили с использованием лабораторного смесителя CONTROLS 65-L0006/AM путем последовательной загрузки в чашу при перемешивании древесной дробленки, молотого шлака, высокодисперсной добавки, раствора силиката натрия и пены из пеногенератора. Для определения оптимального соотношения компонентов вяжущего и наполнителя, при которых может быть получен композитный материал, удовлетворяющий требованиям к самонесущим блокам конструкционно-теплоизоляционного назначения (марка плотности в сухом состоянии D600, класс прочности на сжатие B1.5), была получена серия образцов, в которых варьировали компоненты в следующих интервалах: шлак 330–440 кг/м³, древесная дробленка 120–160 кг/м³, отношение затворитель/шлак 0,5–0,7. Общая продолжительность перемешивания бетонной смеси с момента загрузки всех компонентов составляла 5 мин. Формование образцов проводили путем послойной укладки и конечного уплотнения смесей в формах на виброплощадке. Заготовки выдерживали в формах при температуре $20 \pm 2 \text{ °C}$ и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 1 сут, затем извлекали из форм и хранили в обычных лабораторных условиях. Часть образцов подвергали термической обработке путем нагрева в термостате

Таблица 1. Химический состав шлака

Содержание оксидов (мас. %)								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2
34,1	11,7	0,6	36,5	10,8	0,7	0,8	2,6	2,2

Таблица 2. Характеристики использованных в работе пенообразователей

Пенообразователь	Плотность, г/см ³	pH
ПБ-Люкс (АО «РХЗ Нордикс», Воскресенск, РФ)	1050–1100	8–10
Эталон (ООО «Аист», Челябинск, РФ)	1120	6,5–8

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

при температурах 80–90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч.

Определение прочностных характеристик полученных образцов (прочности при сжатии и изгибе) проводили после 28 сут хранения с использованием универсальной испытательной машины UPB 86/200 Form+Test (Германия). Испытания образцов одного и того же состава были повторены шесть раз, на основании полученных результатов были рассчитаны средние значения прочности. Определение водопоглощения (по массе и объему) пористого композита проводили в соответствии с ГОСТ 12730.3-2020 путем взвешивания образцов в водонасыщенном состоянии. Термический анализ (ДТА+ТГ) материалов проводили с использованием термоанализатора SDT Q600 (США), образцы нагревали до 1000 °С при скорости возрастания температуры 10 °/мин, скорость продувки воздуха через печь анализатора составляла 100 мл/мин. Тепловыделение в ходе гидратации вяжущего изучали с использованием изотермической калориметрии (ТАМ Air 3116-2, TA Instruments, США). Фазовый состав материалов определяли по данным рентгенофазового анализа, рентгенодифрактограммы регистрировали с использованием дифрактометра SHIMADZU XRD 6000 (Япония) с медным анодом ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1,54056 \text{ \AA}$; напряжение на трубке 40 кВ, ток 40 мА) в диапазоне углов $2\theta = 5\text{--}70^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$. Определение площади удельной поверхности материалов проводилось по методу Брунауэра-Эмметта-Теллера с использованием прибора Quantachrome NOVA 2200e (США) по низкотемпературной адсорбции-десорбции азота при 77 К. Измерения теплопроводности

образцов проводили с использованием измерителя типа ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076-99. Для изучения морфологии и структуры образцов использовали многофункциональный сканирующий электронный микроскоп JEOL JCM-6000 Plus (Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для формирования пористой структуры древесно-минерального композита принципиальным условием является получение пены с контролируемой кратностью, устойчивость которой позволит до начала схватывания вяжущего сохранить высокую дисперсность и однородность распределения пузырьков воздуха в объеме смеси исходных компонентов. Предварительные эксперименты с различными пенообразователями (табл. 2) показали, что белковый пенообразователь в щелочной среде силиката натрия образует менее устойчивую пену с малой кратностью по сравнению с синтетическим пенообразователем. Дальнейшее установление оптимальных соотношений компонентов для получения пены проводили с синтетическим пенообразователем. На рисунке 1 приведены результаты определения кратности получаемой пены и количества отделившейся жидкости в зависимости от состава исходной пенообразующей смеси.

Из полученных данных следует (рис. 1), что присутствие силиката натрия и бентонита в пенообразующей смеси различным образом влияет на характеристики получаемой пены. Если кратность пены практически не зависит от присутствия обеих добавок при их содержании $w \leq 4\%$ (рис. 1а), то водоотделение при расслоении пены в присутствии бен-

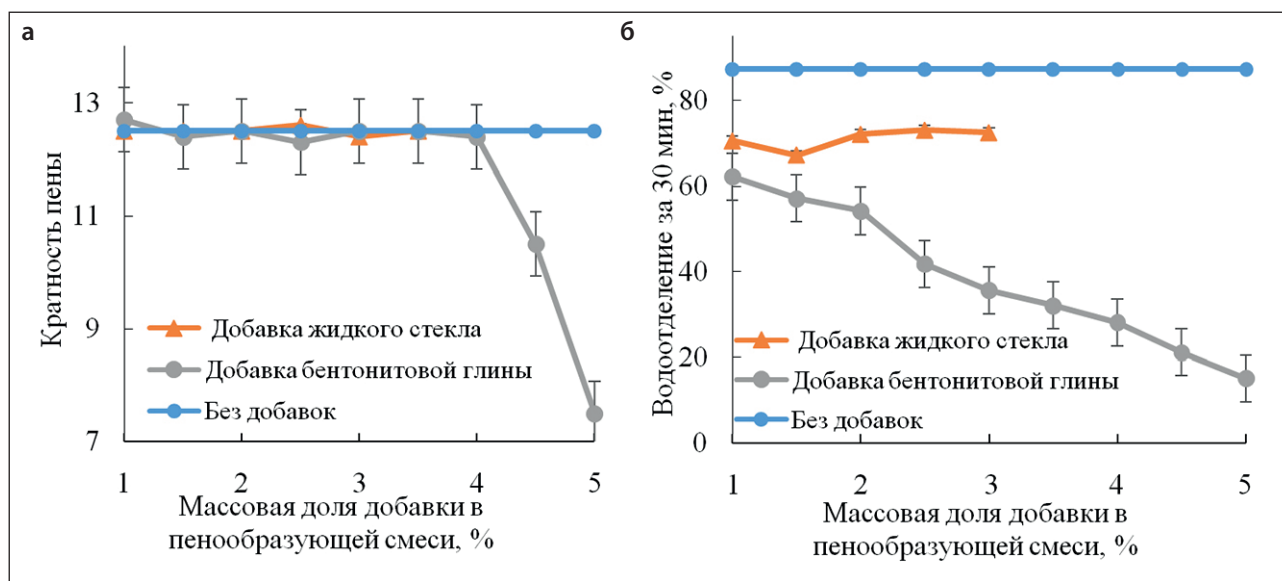


Рис. 1. Влияние присутствия жидкого стекла и бентонита в пенообразующем растворе (пенообразователь «ПБ-Люкс») на (а) кратность и (б) устойчивость пены

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

тонита в течение длительного времени существенно понижается (рис. 1б). Стабилизирующее действие микрочастиц бентонита связано с их сорбционным накоплением на границе раздела воздух/раствор, что затрудняет коалесценцию единичных пузырьков и увеличивает продолжительность устойчивого состояния пены. Более высокое содержание бентонита (более 4%) лучше стабилизирует пену, но уменьшает ее кратность (рис. 1а). Следовательно, введение бентонита в количестве 4% в жидкую фазу достаточно для получения пены с наибольшей кратностью и устойчивой в течение времени формирования пористой структуры композита.

Важными факторами, определяющими технологические характеристики бетонной смеси, являются удобоукладываемость, плотность, расслаиваемость, а также время начала и конца схватывания вяжущего. Для используемого в работе шлакосиликатного вяжущего были определены параметры, позволяющие достичь необходимого класса прочности камня для получения композиционного материала (табл. 3).

Достаточно короткие сроки схватывания в совокупности с высокой прочностью характерны для бесцементных шлакощелочных вяжущих [2], что объясняется интенсивно протекающим взаимодействием щелочного активатора с аморфными (стеклофаза) компонентами шлака с образованием плотной полимеризованной алюмосиликатной матрицы (так

называемым «геополимербетоном»). Для определения влияния введения пены на особенности взаимодействия между компонентами вяжущего была изучена кинетика тепловыделения в шлакощелочной смеси заданного состава (табл. 3) в присутствии пенообразователя и бентонита с использованием изотермической калориметрии. По данным измерений температуры контрольной смеси (без пенообразователя) и смеси, содержащей 0,35% пенообразующего раствора из расчета на массу шлака, определены зависимости теплового потока от времени реакции (до 240 ч), приведенные на рисунке 2.

Из результатов калориметрии следует (рис. 2), для контрольного образца смеси и образца с пенообразователем наблюдается несколько периодов тепловыделения. Начальный период с максимумом при времени ~10 мин характерен для обоих образцов, величина теплового потока практически не зависит от их состава. Второй период с максимумом тепловыделения по истечении ~2 ч характеризуется меньшим тепловым эффектом для образца с пенообразователем, что можно объяснить сорбцией ПАВ на поверхности частиц шлака и связанным с этим некоторым замедлением процесса формирования новообразований в затвердевшем материале (рис. 2а). При увеличении продолжительности взаимодействия в системе «шлак–затворитель» наблюдается смещение максимума тепловыделения в случае пористого

Таблица 3. Состав и характеристики шлакосиликатного вяжущего

Отношение жидкое стекло /шлак	Сроки схватывания, мин		Нормальная плотность, %	Марка по прочности
	Начало	Конец		
0,7	30	50	46	M300

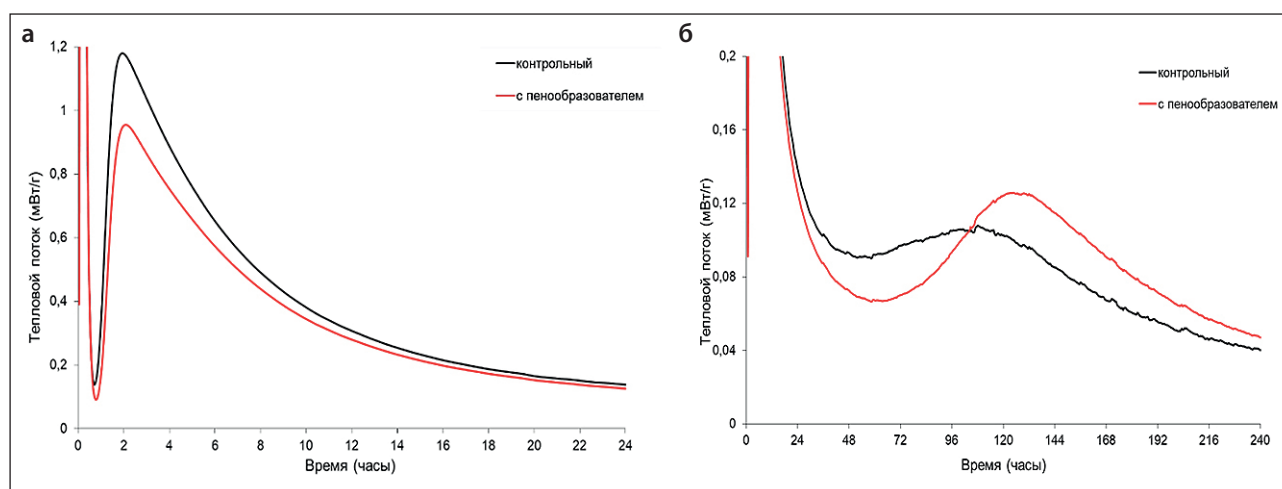


Рис. 2. Зависимости теплового потока от времени выдержки шлакосиликатной смеси в присутствии и в отсутствие пенообразователя на (а) начальном и (б) конечном этапе формирования структуры шлакосиликатного камня

образца (на ~18 ч) и его сужение по шкале времени по сравнению с контрольным образцом (рис. 2б). Этот эффект также объясняется торможением процессов структурообразования в твердом материале, которые по своей природе являются диффузионными. Тем не менее, сумма тепловых потоков во всем изученном интервале формирования структуры для обоих образцов практически совпадает и составляет порядка 105 Дж/г. Следовательно, вспенивание шлакосиликатной смеси не приводит к существенному изменению интенсивности гидратационных процессов, в особенности на ранних сроках твердения.

Известно, что шлакощелочные вяжущие быстро схватываются и набирают марочную прочность при термообработке [2, 20]. Для определения влияния температуры на фазовый состав продуктов, образующихся в ходе отвердевания вяжущего, были проведены две серии экспериментов при нагревании образцов при 80 и 90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч. Полученные данные РФА сравнивали с таковыми для образцов, твердевших при нормальных условиях в течение 1 и 28 сут. Типичная рентгенодифрактограмма шлакосиликатного камня приведена на рисунке 3.

Из данных РФА следует (рис. 3), что основными кристаллическими фазами, образующимися в ходе твердения как при нормальных условиях, так и при нагревании, являются окерманит (силикат каль-

ция-магния) и кальцит, общее содержание которых не превышает 10 мас.%. Преобладающим компонентом (до 90%) в шлакосиликатном камне является аморфная фаза. Кальцит образуется вследствие карбонизации щелочесодержащего материала, силикат кальция-магния образуется за счет взаимодействия жидкого стекла с компонентами шлака. Очевидно, что температурные условия твердения материала недостаточны для кристаллизации склонных к стеклообразованию силикатов, образующихся в системе. Таким образом, термообработка шлакосиликатного камня не приводит к существенному изменению состава кристаллических новообразований и увеличению их доли в материале.

По причине преимущественно рентгеноаморфной структуры продуктов взаимодействия в системе «шлак-жидкое стекло», состав продуктов, образующихся при введении в систему древесины, оценивали при помощи термического анализа. Образец для анализа имел следующий исходный состав: шлак 385 кг/м³, древесная дробленка 138 кг/м³, раствор жидкого стекла 270 кг/м³, пенообразователь 1,35 кг/м³, бентонит 1,54 кг/м³. Средние значения потери массы при нагревании до 1000 °С для образцов, полученных при нормальных условиях твердения, составляют 15%, после термической обработки – 10%. Типичные ТГ-ДТГ кривые линейного нагревания образцов приведены на рисунке 4.

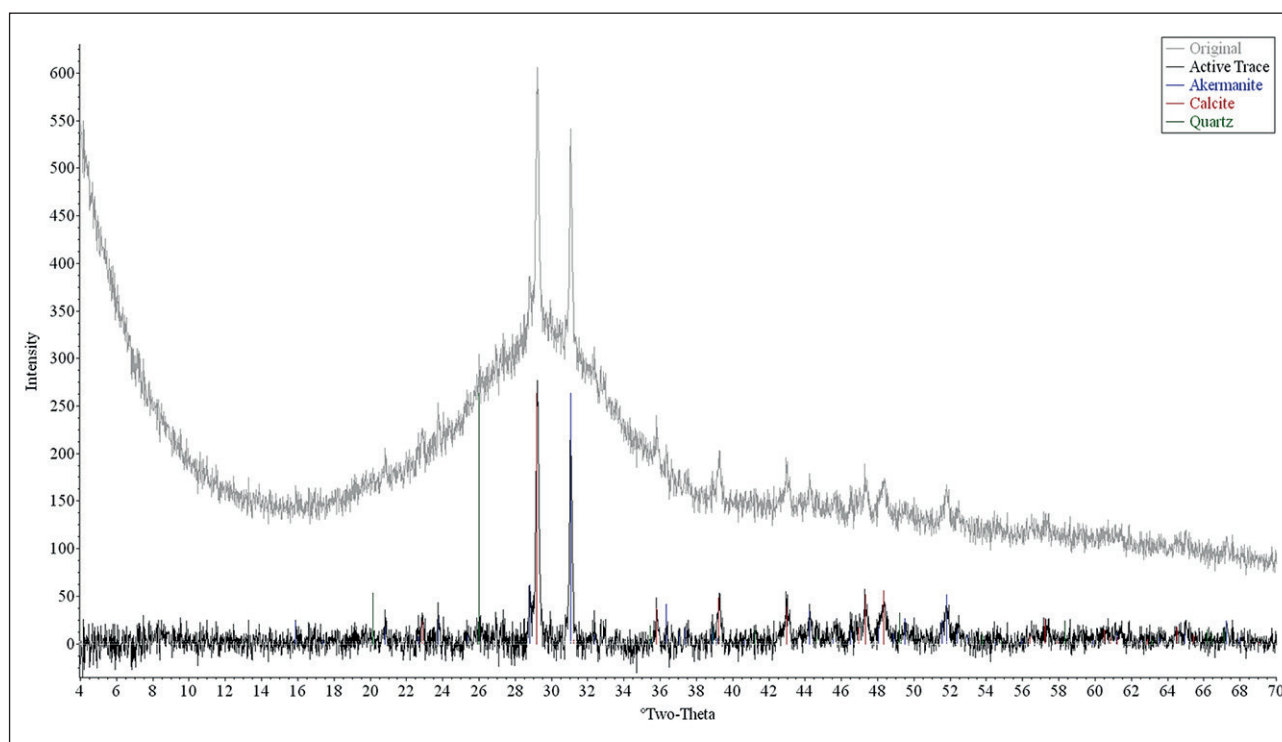


Рис. 3. Рентгенодифрактограмма образца шлакосиликатного камня (отношение жидкое стекло/шлак 0,7), подвергнутого термообработке при 90 °С в течение 10 ч

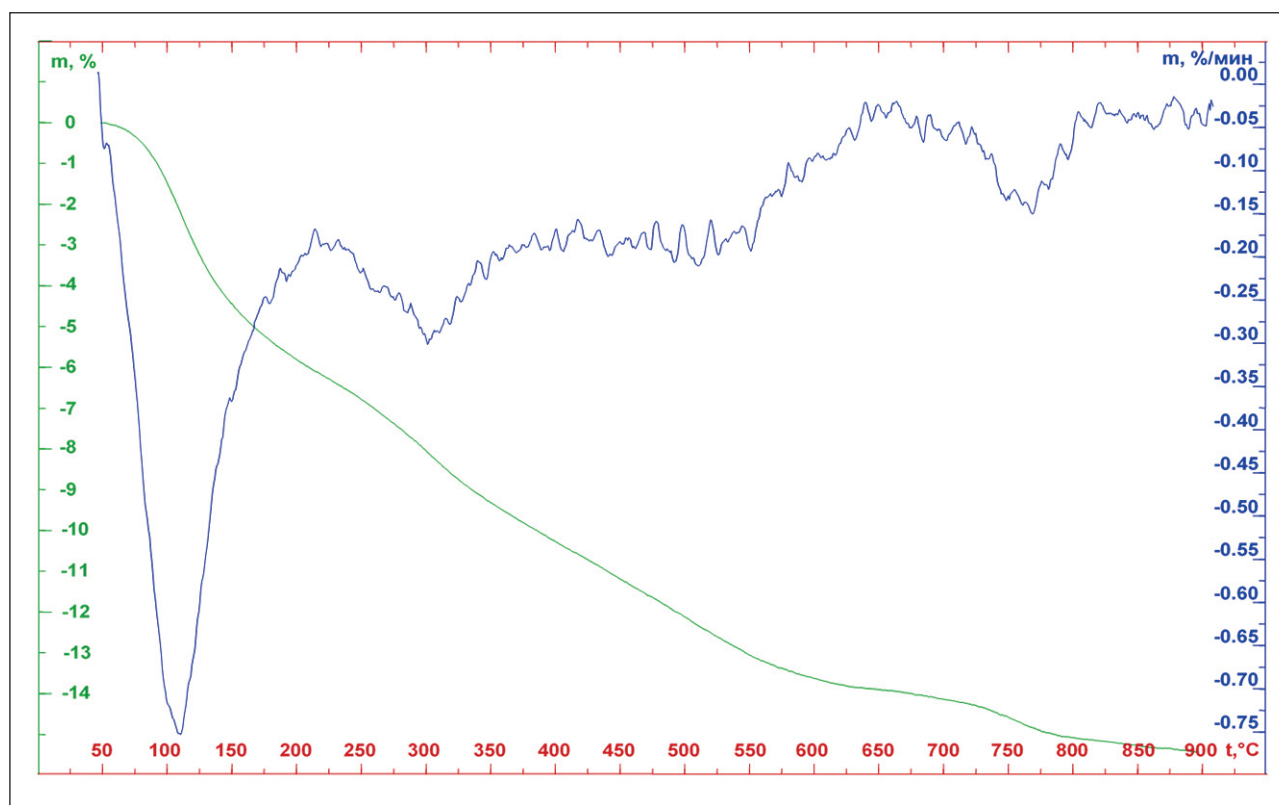


Рис. 4. ТГ (зеленая) и ДТГ (синяя) кривые, полученные при линейном нагревании образца пористого древесно-минерального композита после 28-ми суток его твердения в обычных лабораторных условиях

Для ТГ кривых материала характерны четыре основных ступени убыли массы и соответствующих им эндотермических эффектов в температурных интервалах 75–150, 225–375, 450–650 и 720–830 °С. В температурном диапазоне 75–150 °С происходит удаление слабосвязанной воды (капиллярной, сорбционной, межслоевой) в гидросиликатах натрия $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. При повышении температуры до 225–375 °С уменьшение массы образцов происходит вследствие дегидратации гидросиликатов кальция типа тоберморита. Слабовыраженный широкий эндотермический эффект в широком интервале температур 450–650 °С отображает термическое разложение (обугливание) древесины в материале. Параллельно этому при данных температурах происходит полная дегидратация тоберморита и гиролита, а также разложение остаточного портландита. Эффекты, обусловленные присутствием этих фаз, в большей мере проявляются на термограммах образцов на больших сроках твердения. Повышение температуры до 720–830 °С сопровождается разложением кальцита CaCO_3 , присутствие которого в образцах подтверждается данными РФА (рис. 3), а также гидроалюмосиликатов кальция и натрия. Образование кальцита в ходе формирования структуры образцов происходит в результате карбонизации

известии и гидросиликатов кальция. Таким образом, данные термического анализа показывают высокую долю новообразований в продуктах взаимодействия компонентов вяжущего, так как наибольшая потеря массы происходит при $T > 150$ °С за счет разложения сложных по составу гидратных фаз. Повышение температур разложения древесного наполнителя обусловлено минерализующим действием щелочно-силикатных компонентов вяжущего.

Особенности пористой структуры и структуры контактной зоны между частицами заполнителя и минеральной матрицей изучали при помощи электронной микроскопии (рис. 5).

Из данных микроскопии следует, что в материале преобладают поры закрытого типа, которые имеют преимущественно сферическую форму и размеры порядка 1 мкм и менее (рис. 5а). Межпоровые перегородки являются сплошными и имеют толщину порядка десятков микрон (рис. 5б). Продукты взаимодействия компонентов вяжущего различаются по морфологии, объемные частицы пластинчатой и призматической формы представляют собой гидросиликаты кальция с осажденными на их поверхности коллоидными частицами бентонита (рис. 5в). Особенностью контактной зоны на границе частиц древесины и минеральной матрицы является ее плот-

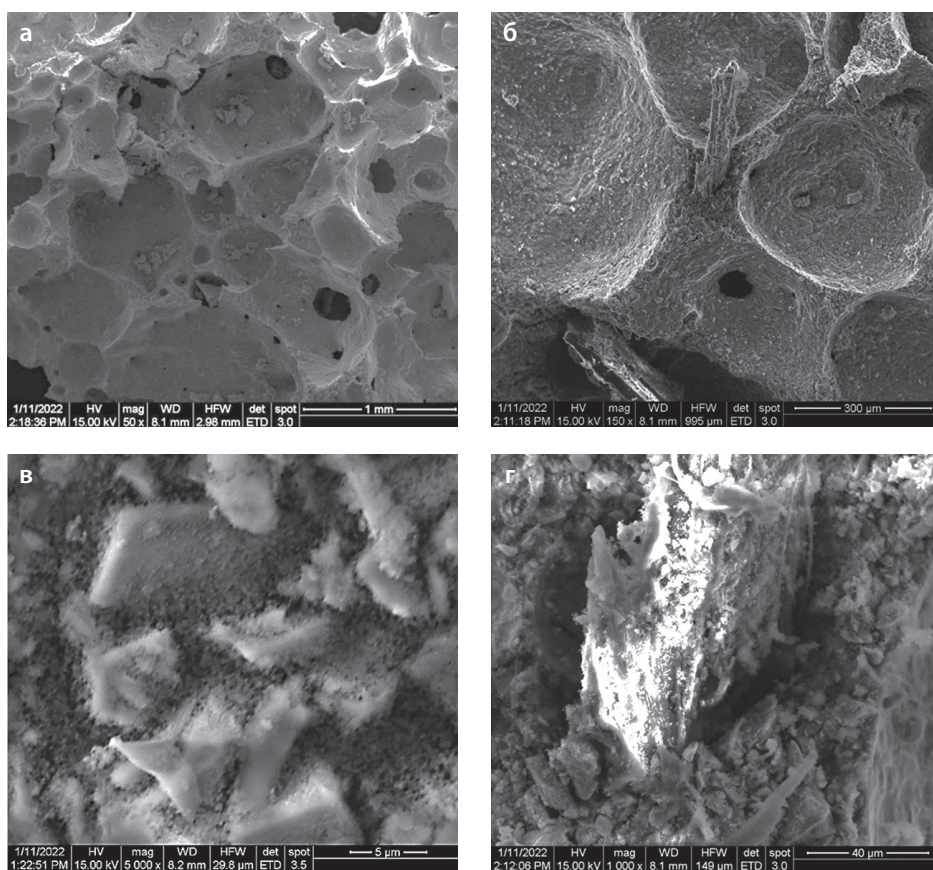


Рис. 5. Микрофотографии сколов пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего в возрасте 28 сут при твердении в нормальных условиях: а – поры различного диаметра; б – распределение пор и древесины в объеме материала; в – гидроалюмосиликатные новообразования между частицами шлака; г – зона контакта древесины с минеральной матрицей

ная и относительно однородная структура (рис. 5г). Поверхность частиц древесины вследствие минерализующего действия затворителя также покрыта продуктами взаимодействия компонентов вяжущего, которые наблюдаются и в минеральной матрице материала. Минерализующее действие жидкого стекла оказывает положительное действие на стабилизацию свойств древесного заполнителя и его термическую стойкость, что согласуется с результатами термического анализа (рис. 4). Кроме того, гидролитическое действие щелочной среды вяжущего на компоненты древесины способствует формированию более плотного их контакта с минеральной матрицей (рис. 5г).

С точки зрения практического применения наиболее важными характеристиками для пористого древесно-минерального композиционного материала являются прочность, пористость, водопоглощение и теплопроводность. Для определения характера влияния соотношения исходных компонентов на прочность материала при сжатии была получена серия образцов в условиях нормального твердения. Массы сырьевых компонентов и значения прочности приведены в таблице 4.

Результаты исследований показали, что прочность при сжатии и плотность композита в большей степени коррелирует с долей шлака в исходной смеси. Зависимость прочностных характеристик

от содержания древесной дробленки в материале выражена менее явно. Например, доля древесины в образце № 3 является наибольшей (отношение древесина/шлак 0,43) среди всех представленных вариантов, тогда как прочность при сжатии принимает промежуточное значение (табл. 4). Образцы № 4 и 6 с высокой прочностью содержат средние количества древесины, образец № 7 с низкой долей древесины (отношение древесина/шлак 0,3) обладает самой низкой прочностью. Количество затворителя может варьироваться в узких пределах: при отношении жидкое стекло/шлак, равном 0,5 и менее, смесь характеризуется низкой удобоукладываемостью, и получаемый материал имеет неоднородную структуру; при отношении, большем 0,7, наблюдается отделение жидкости и расслоение образца. Наиболее воспроизводимые характеристики образцов материала с однородной пористостью получаются при оптимальном отношении жидкое стекло/шлак, равном 0,7.

Термообработка композиционного материала приводит к закономерному росту его прочности. На рис. 6 приведены результаты измерения прочности при сжатии образцов состава № 3 с наибольшей долей древесины (табл. 4) после их изотермического нагревания при 80 и 90 °С с различной продолжительностью.

Таблица 4. Соотношение сырьевых компонентов для получения пористого композиционного материала и его характеристики в возрасте 28 сут (твердение при нормальных условиях, отношение жидкое стекло/шлак 0,7)

Образец	Шлак, кг/м ³	Древесная дробленка, кг/м ³	Пенообразователь, кг/м ³	Бентонит, кг/м ³	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Прочность при сжатии R_{cp} , МПа
1	347	124	1,21	1,38	552	1,38
2	424	124	1,48	1,69	640	2,78
3	347	152	1,21	1,38	575	2,38
4	424	152	1,48	1,69	668	3,33
5	331	138	1,16	1,32	546	1,40
6	439	138	1,54	1,75	680	3,65
7	385	118	1,35	1,54	593	1,34
8	385	158	1,35	1,54	627	1,75
9	385	138	1,35	1,54	607	1,50

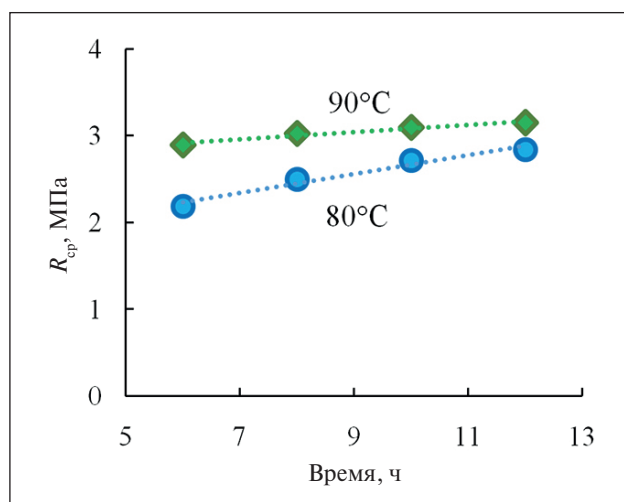


Рис. 6. Зависимость прочности при сжатии (R_{cp}) образцов древесно-минерального композита (состав № 3, табл. 4) от продолжительности их изотермического нагрева при различных температурах (относительная влажность воздуха не менее 90%)

Увеличение прочности материала при термообработке (рис. 6) происходит за счет повышения глубины взаимодействия компонентов шлакосиликатного вяжущего, увеличения прочности связывания частиц древесного заполнителя с минеральной матрицей и армирующей функции заполнителя. Сопоставление данных рис. 6 и табл. 4 показывает, что при термообработке может быть достигнуто повышение прочности материала на 15–20% по сравнению с образцами, полученными при нормальных условиях твердения. Термообработка при 90 °С и продолжительности 8–10 ч достаточна для достижения наибольших показателей прочности, увеличение

продолжительности нагревания нецелесообразно (рис. 6). Применение более низких температур снижает эффективность процесса получения материала за счет увеличения продолжительности нагрева, температуры выше 90 °С, что приводит к усиленному удалению воды, способствует деструкции и разупрочнению материала.

Водопоглощение древесно-минерального композита непосредственно связано с его пористостью и может существенно понижать прочность материала, прежде всего, за счет набухания частиц древесины и связанного с этим разупрочнения материала. Для оценки водопоглощения проводили взвешивание образцов со средними значениями содержания вяжущего и заполнителя (состав № 9, табл. 4) в исходной смеси, твердевших при нормальных условиях в течение 28 сут. По результатам определения прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии рассчитывали коэффициент размягчения материала как отношение прочностей влажного и сухого образцов. Результаты определения водопоглощения приведены в таблице 5.

Из характеристик водопоглощения следует, что полученный композиционный материал обладает низкой водостойкостью, во влажной среде прочность и морозостойкость такого материала будет

Таблица 5. Водопоглощение пористого древесно-минерального композиционного материала

Характеристика	Значение
Водопоглощение по массе W_m , %	74
Водопоглощение по объему W_v , %	45
Коэффициент размягчения K_p	0,63

существенно снижаться. Помимо проникновения в открытые поры вода впитывается частицами древесины, которые вследствие набухания также будут являться причиной разупрочнения материала. В действительности наблюдаемая тенденция свойственна для всех пористых и содержащих древесину материалов, поэтому такие материалы рекомендуется применять в условиях низкой влажности или защищать их от воздействия влаги (гидрофобизация поверхности, пропитка специальными составами).

Измерения теплопроводности образцов пористого композиционного материала со средними значениями плотности и прочности (составы № 3, 8, 9, табл. 4) показали, что среднее значение теплопроводности составляет порядка 0,08 Вт/(м·К). Полученные величины теплопроводности близки к таковым для арболита на портландцементе и существенно ниже, чем для пено- и газобетона, что подтверждает хорошие теплоизоляционные свойства материала.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлена возможность получения пористого композиционного древесно-минерального материала (аналог арболита) на основе шлакосиликатного вяжущего, древесной дробленки в качестве заполнителя, синтетического пенообразователя и ультрадисперсного алюмосиликатного стабилизатора пены (бентонита). Варьирование содержания молотого доменного шлака (330–440 кг/м³) и древесины (125–160 кг/м³) при оптимальных соотношениях жидкое стекло/шлак 0,7 и пенообразующая смесь/шлак 0,0035 (3,5% пенообразователя + 4% бентонита) позволяет получить композиционный материал плотностью 550–680 кг/м³, прочностью

при сжатии 1,35–3,65 МПа, открытой пористостью 45–50%, средней теплопроводностью 0,08 Вт/(м·К). Показано, что тепловлажностная обработка композита при 80–90 °С в течение 10–12 ч способствует набору прочности, которая при нормальном твердении достигается в течение 28 сут.

2. Стабилизация однородной пористой структуры полученного композиционного материала (размеры сферических пор менее 1 мм) достигается путем введения в пенообразующую смесь ультрадисперсной гелеобразующей добавки (бентонит) с размерами частиц 1–5 мкм. Частицы бентонита распределяются в стенках пузырьков пены, снижают их способность к коалесценции и упрочняют стенки пор в матрице минерального вяжущего в процессе схватывания за счет гелеобразования.

3. В ходе схватывания и твердения шлакосиликатного вяжущего образуются преимущественно аморфные продукты (гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция и натрия), доля кристаллических новообразований (кальцит, окерманит) не превышает 10%. Гидролитическое действие щелочной среды вяжущего на компоненты древесины способствует формированию более плотного их контакта с минеральной матрицей. Контактная зона шлакосиликатной матрицы с частицами древесного заполнителя имеет плотную однородную структуру, в ней присутствуют частицы гидроалюмосиликатов кальция в виде лепестков, которые образуются в областях скопления коллоидных частиц бентонита на границах раздела контактирующих фаз.

4. Полученный в работе пористый древесно-минеральный композиционный материал может быть использован для производства легких несущих конструктивных элементов, в качестве шумо- и теплоизоляционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Miraldo S., Lopes S., Pacheco-Torgal F., Lopes A. Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. *Construction and Building Materials*. 2021: 298:123729(1-26). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729>
2. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. From Portland cement to alkali-activated system: advances in wood-cement composites for sustainable building applications. *Cleaner Materials*. 2026:19:100365(1-44). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100365>
3. Bouguerra A., Ledhem A., de Barquin F., Dheilly R.M., Quéneudec M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*. 1998:28(8):1179–1190. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00075-1)
4. Sarmin S.N., Welling J., Krause A., Shalbafan A. Investigating the possibility of geopolymer to produce inorganic-bonded wood composites for multifunctional construction material – A Review. *BioResources*. 2014:9(4):7941–7950.
5. Bouguerra A., Amiri O., Ait-Mokhtar A., Diop M. Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*. 2002:54:103–112. <https://doi.org/10.1680/mac.2002.54.2.103>
6. Siddique R. Properties of concrete incorporating high volumes of class f fly ash and san fibers. *Cement and Concrete Research*. 2004:34(1):37–42. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00192-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00192-3)
7. Jauberthie R., Rendell F., Tamba S., Cissé I.K. Properties of cement-rice husk mixture. *Construction and Building Materials*. 2003:17(4):239–243. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(03)00005-9)

8. Yagubkin, A., Shabanov, D., Niyakovskii, A., Romanovski V. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption. *Biomass Conv. Bioref.* 2025;15:13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>
9. Abdulwahid, M.Y., Akinwande, A.A., Kamarou, M., Romanovski V., Al-Qasem I.A. The production of environmentally friendly building materials out of recycling walnut shell waste: a brief review. *Biomass Conv. Bioref.* 2024; 4:24963–24972. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04760-2>
10. Muñoz S., Villena L., Tesen F., Coronel Y., Garcia J., Brast C. Influence of coconut fiber on mortar properties in masonry walls. *Electronic Journal of Structural Engineering.* 2023;23:52–58. <https://doi.org/10.56748/ejse.23391>.
11. Cabanillas Hernandez G., García Chumacero J.M., Villegas Granados L.M., Arriola Carrasco G.G., Marín Bardales N.H. Sustainable use of wood sawdust as a replacement for fine aggregate to improve the properties of concrete: a Peruvian case study. *Innov. Infrastruct. Solut.* 2024;9:233. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01567-6>
12. Koohestani B., Koubaa A., Belem T., Bussièrè B., Bouzahzah H. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials.* 2016;121:222–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118>
13. Quiroga A., Marzocchi V., Rintoul I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of populus euroamericana wood fibers. *Composites Part B: Engineering.* 2016;84:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>
14. Bederina M., Laidoudi B., Goullieux A., Khenfer M.M., Bali A., Quéneudec M. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials.* 2009;23(3):1311–1315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029>
15. Govin A., Peschard A., Guyonnet R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites.* 2006;28(1):12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>
16. Ye H., Asante B., Schmidt G., Krause A., Zhang Y., Yu Z. Eco-friendly geopolymer-wood building materials: Interactions between geopolymer and wood cell wall. *Journal of Cleaner Production.* 2023;420:138381(1-10). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138381>
17. Ye H., Zhang Y., Yu Z., Mu J. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2018;173:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.028>
18. Al Bakri Abdullah M.M., Izzat A.M., Muhammad Faheem M.T., Kamarudin H., Khairul Nizar I., Bnhussain M., Rafiza A.R., Zarina Y., Liyana J. Feasibility of producing wood fibre-reinforced geopolymer composites (WFRGC). *Advanced Materials Research.* 2012;626:918–925. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.626.918>
19. Olayiwola H.O., Amiandamhen S.O., Meincken M., Tyhoda L. Investigating the suitability of fly ash/metakaolin-based geopolymers reinforced with south african alien invasive wood and sugarcane bagasse residues for use in outdoor conditions. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2021;79(3):611–627. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01636-4>
20. Kielè A., Vaičiukynienė D., Tamošaitis G., Pupeikis D., Bistrickaitė R. Wood shavings and alkali-activated slag bio-composite. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2020;78(3):513–522. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01516-x>
21. Sarmin S.N. The influence of different wood aggregates on the properties of geopolymer composites. *Key Engineering Materials.* 2016;723:74–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.723.74>
22. Berzins A., Morozovs A., Gross U., Iejavs J. Mechanical properties of wood-geopolymer composite. *Proc. 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, 24.-26.05.2017 Jelgava, Latvia. 1167–1173. <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N251>
23. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. Characterisation of a novel sustainable wood-geopolymer masonry units. *Developments in the Built Environment.* 2024;20:100540(1-13). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100540>

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

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

Коршунов Андрей Владимирович – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, korshunovav@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7585-0953>







ВКЛАД АВТОРОВ

Авторами сделан эквивалентный вклад при подготовке публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 03.04.2026; принята к публикации 09.04.2026.

Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods

Alexey D. Zhukov^{1,5} , Daniil R. Nikolaev¹ , Petr M. Zhuk² , Andrey A. Medvedev^{1,4} , Boris A. Efimov¹ , Bobrova Ekaterina Yu. Bobrova^{1,3*} 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

² Moscow Institute of Architecture, 107031, Moscow, St. Nativacka, 11, pp. 2, Russian Federation

³ National Research University "Higher School of Economics", 109028, Moscow, Pokrovsky Blvd., 11 pp. 10, Russian Federation

⁴ Russian Geologic Exploration University, 117485, Moscow, ul. Mikluho-Maclaiya, 23, Russian Federation

⁵ Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 127238, Moscow, Lokomotivny Proezd, 21, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: mla-gasis@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Improving the efficiency of ceramic bricks and blocks involves reducing their average density and corresponding thermal conductivity. One possible approach is to introduce porosity into the ceramic structure using burnable additives or specialized foams during the preparation of the ceramic mixture. Another option is incorporating ultra-lightweight aggregates, particularly crushed foam glass. The aim of this study was to develop a method for determining and optimizing the formulations of lightweight ceramic bricks based on regulatory requirements for strength characteristics, density, and thermal conductivity. **Methods and materials.** The raw materials used included medium-plasticity loam, a fluxing component (finely ground glass waste), and crushed foam glass gravel. The properties of the samples were assessed using standardized methods, while statistical and digital techniques were employed for experimental planning and data processing. **Results.** It was found that the optimal conditions include drying at 80 °C and 55% air humidity, followed by firing at 900–950 °C with the introduction of a fluxing component. The optimal values of the factors were determined as follows: foam glass density: 150 kg/m³; foam glass consumption: 30 kg/m³; optimal particle size of crushed foam glass: 0.68–0.69 mm; fluxing additive content: 8.3–8.4% of the clay mass. These parameters correspond to the following material properties: Average density: 1320–1360 kg/m³; Compressive strength: 15–16 MPa; Thermal conductivity: 0.15–0.16 W/(m·°C); Frost resistance grade: F35. **Discussion.** The use of digital methods revealed the influence of variable factors on the material's properties (strength, density, and thermal conductivity), which was confirmed through model validation in active experiment series and structural analysis of the material. **Conclusion.** This research has established a methodological framework for predicting the properties of ceramic products and optimizing their composition using digital methods. Requirements for optimizing the properties of foam glass based products were determined, including guidelines for the consumption of foam glass and fluxing agents. The resulting materials fully comply with the relevant standards for such products. The lightweight brick exhibits both structural and thermal insulation properties, making it suitable for use as a wall material.

KEYWORDS: ceramic brick, crushed foam glass, glass waste, digital optimization, statistical planning

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out as part of the research work on the topic of the Federal Research Institute of the Russian Academy of Natural Sciences No. 3.1.2.1 "Development of the theoretical foundations for the production of particularly light inorganic building materials and the study of the effect of porous structure on their thermophysical and acoustic characteristics", carried out on behalf of the Ministry of Construction of Russia. The research was conducted at the experimental base of JSC ROCWOOL. Part of the research was carried out at the National Research Moscow State University of Civil Engineering as part of the implementation of the University's Development Program "PRIORITY 2030". Project 3.1 "Scientific breakthrough in the construction industry — new technologies, new materials, new methods".

FOR CITATION:

Zhukov A.D., Nikolaev D.R., Zhuk P.M., Medvedev A.A., Yefimov B.A., Bobrova E.Yu. Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов

Алексей Дмитриевич Жуков^{1,5} , Даниил Романович Николаев¹ , Петр Михайлович Жук² ,
Андрей Александрович Медведев^{1,4} , Борис Александрович Ефимов¹ , Екатерина Юрьевна Боброва^{1,3*} 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

² Московский архитектурный институт, Москва, 107031, Москва, ул. Рождественка, 11, стр. 2, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, 109028, Москва, Покровский бул., 11, стр. 10, Российская Федерация

⁴ Московский геологоразведочный университет, Москва, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация

⁵ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение эффективности керамического кирпича и камней связано со снижением средней плотности изделий и соответствующей теплопроводностью. Одним из возможных путей является поризация структуры керамического изделия с помощью выгорающих добавок или введения специальных пен при приготовлении керамической смеси. Другая возможность связана с введением в структуру особо легких заполнителей и, в частности, дробленого пеностекла. Целью исследований являлась разработка методики определения и оптимизации рецептур легкого керамического кирпича, основанная на нормативных требованиях по прочностным характеристикам, плотности и теплопроводности. **Методы и материалы.** В качестве сырья использовались суглинок средней пластичности и флюсующий компонент (тонкомолотый бой стекла), а также измельченный пеностеклянный щебень. Свойства образцов определялись по нормативным методикам, при планировании и обработке результатов эксперимента использовались статистические и цифровые методы. **Результаты.** Установлено, что оптимальными являются сушка при 80 °С и влажности воздуха 55% и обжиг в интервале температур 900–950 °С при условии введения флюсующего компонента. Установлено, что оптимальными являются значения факторов: средняя плотность пеностекла 150 кг/м³; расход пеностекла 30 кг/м³; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла 0,68–0,69 мм; содержание флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют: средняя плотность 1320–1360 кг/м³; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность 0,15–0,16 Вт/(м·°С); марка по морозостойкости: F35. **Обсуждение.** Применение цифровых методов позволило установить характер влияния варьируемых факторов на свойства материала: его прочность, плотность и теплопроводность, что было подтверждено при проверке адекватности моделей как в сериях активного эксперимента, так и при исследовании структуры материала. **Заключение.** Разработаны основы методики прогнозирования свойств керамических изделий и подбора его состава с помощью цифровых методов, сформированы требования по оптимизации свойств изделий из пеностекла, а также по расходам пеностекла и флюсующего компонента. Полученные материалы вполне соответствуют требованиям к изделиям. Легкий кирпич является конструкционно-теплоизоляционным и может использоваться как стеновой материал.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: керамический кирпич, дробленое пеностекло, бой стекла, цифровая оптимизация, статистическое планирование

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования проводились в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН № 3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолегких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России. Исследования проводились на экспериментальной базе ЗАО РОКВУЛ. Часть исследований выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Жуков А.Д., Николаев Д.Р., Жук П.М., Медведев А.А., Ефимов Б.А., Боброва Е.Ю. Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

INTRODUCTION

Ceramics have been used in construction for millennia. At the end of the 20th century, with the adoption of new thermal engineering standards, ceramic wall paneling met the requirements for heat conductivity and cladding for thermal resistance. Note that the construction of a brick wall in 2–2.5 bricks met the requirements of comfort, but the new regulations were unattainable for walls made of solid brick. In this regard, for most regions, laminated cladding was recommended, which includes effective heat insulation elements: stone cotton-based tiles or extruded polystyrene foam, with the cost of construction increased significantly [1–3].

The adopted direction to improve energy efficiency gave an incentive to develop ceramic products with lower density while maintaining the level of strength and frost resistance of materials: vacuum products and porous wall ceramics. Light pottery products had lower heat conductivity, which increased their thermal performance and reduced weight, reducing the load on the foundation [4–6]. The production of light (heat-insulating and structural) wall materials could be carried out in several ways. First, by increasing the emptiness of the articles to some limit. Second, by polarizing the article during the stages of forming, drying, and firing. The third (combined) method, combining the first two [7–9].

The formation of a high-porous ceramic skull can be carried out by means of burn-out additives, by introducing wood sawdust or sieving polystyrene. The second most important method is to increase the porosity of the ceramic brick by creating a cellular structure as in the gas formation process or mixing with special foams [10–12]. How a variety of this method can be considered for obtaining ceramic aerogels [13, 14]. The difficulties for materials in this group are due to the need to create special foams, as well as soft drying modes, that is, with low temperatures and heat transfer speeds. Otherwise, there was a risk of uneven placement and sedimentation or cracking of the ceramic billet.

The solution to the problem of obtaining light materials while maintaining quality characteristics is possible through the introduction in their composition at the stage of preparation of mixtures of light fillers. For such a light filler, granular mining waste of various types [15, 16] and waste from thermal power plants [17, 18] can be used. Promising results are obtained by using a particularly light microsphere of different nature [19–21]. High-porous aggregates may be used for refractory vermiculite and refractory perlite sand. Perlite sand has high water absorption, which significantly increases the drying time of the semi-processed material. Some researchers have noted the advisability of using heating foam [22–24]. Plate foam is not produced on an industrial scale in the Russian Federation, but it is produced in the form of a foam stone,

the usefulness of which is due to its relatively low water absorption and comparability with the characteristics of a ceramic skull.

The technology of ceramic products includes technological retooling of raw materials, forming, drying and firing [25–27]. The drying duration of articles depends on the properties of the clay mixture, relative humidity of the heat carrier, size, shape and configuration of the article, temperature drying mode, structural features of the drying devices. The drying time of products varies in industrial dryers or dry sheds from 2 to 20 days, and in laboratory drying cabinets from 6 to 48 hours. The temperature regime of burning brick and effective ceramic stones is conditionally divided into four periods: leisure (temperature up to 200 °C), heating (700–800 °C), burning itself (900–1050 °C), cooling (cooling up to 40–50 °C). In the case of use of ground foam, it is important to correct the temperature of the ceramic head sintering, which can be carried out by inserting a thread. Including fine-grained glazing [28–30].

Taking into account data analysis of formulations and technologies of heat-insulating and structural building ceramics, the aim of the research is formulated: development of a methodology for defining and optimizing formulations of light ceramic bricks, which is based on regulatory requirements for the strength, density and thermal conductivity of articles.

METHODS AND MATERIALS

The main components of a mixture for making light ceramic bricks are: suckling, crushed foam glass, ground glazing; for correcting the temperature of the sintering, fine-grained glass waste (fluxous component), which is similar in composition to the raw material for the production of foam glass. Raw material preparation was carried out according to the generally accepted technology. Ceramic brick forming was carried out in a plastic manner, with a 22–24% molded moisture content.

Loam has a highly dispersed structure, a commotion texture. It is easy to crush and soaks well in the water. Loam belongs to the group of moderately plastic raw materials (plasticity number 12–19), which are not very dry. Loam is a poly-mineral raw material. The content of SiO₂ and Al₂O₃ oxides is 52–53% and 11–12%, respectively; losses at calcination are 7–8%. The clay substance is represented by kaolinite (6–15 %), montmorillonite (10–18 %), hydromica (5–12 %) and quartz as an impurity.

Foam glass is a heating material with an average density of 80 kg/m³ to 200 kg/m³. For the production of heat-insulating foam glass, glassware is most often used; its chemical composition is similar to that of aluminium window glass. These glasses contain mass % of: SiO₂ 72–73; Al₂O₃ 0.5–1; MgO 3,5–4; CaO 6–6,5; Na₂O 15,2–15,5; SO₃ 0.3–0.5. Glass thicknesses can be spun in tempera-

ture ranges from 600 to 1000 °C. Bulk density of foamed pebble 130–170 kg/m³; true density – 2180 kg/m³; water absorption by volume 2.7–4.4%. The heat conductivity in dry state is 0.08 W/(m °C); the increase of heat conductivity by 1% humidity – 0.001 W/(m °C%).

The achievement of the goal was based on the following tasks. First, it was necessary to study the patterns of drying of the designed products. Secondly, using statistical methods, to study the effect of formulation parameters on product properties. Third, using digital methods, develop a methodology for optimizing the composition of light ceramic brick.

Theoretically, the drying process is characterized by three periods: heating, constant and falling droughts. In real products, due to the geometric factor and under conditions of contact of a heat carrier with a product in five planes (one stretcher plane is adjacent to the pallet), the constant drying rate period may be weakly pronounced.

The overall dynamics of the drying process are shown in Fig. 1. The shrinkage of articles in length and width is not large, so it should be assumed that the articles have limited sensitivity to drying. The dependence of drying time on temperature and speed of heat transfer allows for harsher regimes compared to foam ceramics. The initial temperature of the heat carrier on the one hand intensifies the drying process, and on the other has an impact on the quality of the products. At a heat carrier temperature of

up to 80 °C, the sample reduction does not exceed 6%, and the products maintain high quality.

The samples were made in size 50×50×50 mm. Drying was carried out in the laboratory drying cabinet at a temperature of 80 °C and relative humidity 50–55 %; drying time – 12 hours. The firing of items was carried out in the furnace at a calculated temperature of 900–950 °C. The firing mode: raising the temperature from 18 to 100 °C – 15 minutes, holding at 100 °C – 10 minutes, raising the temperature to 650 °C – 120 minutes, holding at 650 °C – 60 minutes, holding the temperature up to 120 minutes, Storage at the calculated temperature – 120 min; natural cooling in the furnace.

The basis of the methodology for studying the influence of the characteristics of foam glass and fluxous component on the properties of products were digital methods of planning and processing experimental results [31, 32], as well as a method of analytical optimization, Developed at MSUCE and tested for many types of construction materials in the formulation and technology applications [33, 34].

The characteristics of the shredded foam glass are taken as variable factors: average density (X_1), flow rate (X_2) and average particle size (X_3), as well as the flow rate of the thin-grain glass as a fluxing component fluxing component (X_4). The response functions are the strength of the article under compression (Y_1 , MPa), its average density (Y_2 , kg/m³) and heat conductivity in dry con-

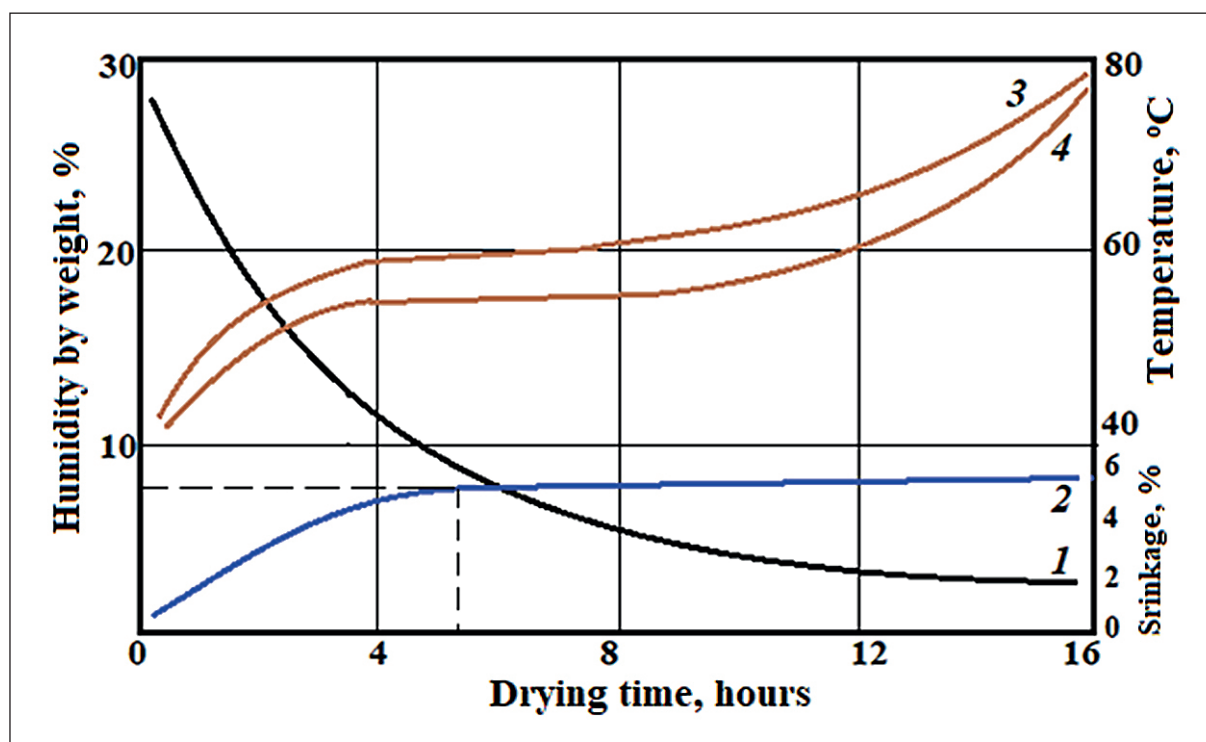


Fig. 1. Drying of ceramic samples on foam (heat transfer agent characteristics: temperature 80 °C, relative humidity 40%): 1 – curve drying; 2 – drying shrinkage; 3, 4 – top and middle temperature of the sample

ditions ($Y_3 = \lambda \cdot 10^{-3} \text{ t}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$). The values of response functions were determined according to GOST 530-2012.

After conducting preliminary series of experiments, the optimal heat treatment conditions were determined and intervals for varying factors were established. The conditions of the experiment are presented in Table 1. A complete quadratic matrix D-optimal plane was adopted in the experiment. In each line of the plan, the experience was repeated 5 times ($n = 5$). Randomization of the sequence of experiments was used to reduce the likelihood of interference and unaccounted factors.

Regression equations derived from experimental data processing in the Statistika program. The significance of the coefficients was checked at confidence intervals for strength and material density. The size of the confidence interval was determined by the Student criterion for 5 experiments and the dispersion of parallel experiments. The confidence intervals (Δb) were for strength – 0.2 MPa, mean density – 9 kg/m³, thermal conductivity – 9 kg/m³, and thermal conductivity – 0.004 W/(m °C). The coefficients of the regression equations, which are smaller in absolute value than the respective confidence intervals, were considered as non-significant and equated to 0.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the active experiment give basic regression equations. The significance of the coefficients was checked at confidence intervals for strength and material density. The size of the confidence interval was determined by the t-criterion for 5 experiments ($n = 5$) and the dispersion of parallel experiments. The confidence intervals (Δb) were for strength – 0,2 MPa, mean density – 9 kg/m³, thermal conductivity – 9 kg/m³, and thermal conductivity – 0,004 W/(m °C). The coefficients of the regression equations, which are smaller in absolute value than the respective confidence intervals, were considered as non-significant and equated to 0.

The basic regression equations are obtained at intervals of varying factors (Table 1) for strength and mean density and heat conductivity:

$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7X_3 + 0,5X_4 + 0,6X_2X_3 - 0,4X_3^2 - 0,3X_4^2; \quad (1)$$

Table 1. Conditions of the three-factor experiment

Factor name	Symbol, X_i	Average factor, \bar{X}_i	Range, ΔX_i	Factor values in levels	
				-1	+1
Average density of foam glass, kg/m ³ (ρ_n)	X_1	120	40	80	160
Foam glass consumption, kg/m ³ (P_n)	X_2	36	8	28	44
Average size of foam glass particles, mm (d_n)	X_3	0.5	0.2	0.3	0.7
The Content of the fluid component, % (C_ϕ)	X_4	10	2	8	12

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14X_3 + 8X_2X_3; \quad (2)$$

$$Y_3 = 144 + 14X_1 - 7X_2 + 4X_1X_2. \quad (3)$$

The assessment of adequacy at the initial level was carried out by comparing calculated and experimental values of the Fischer criterion (F-criterion) and further as a result of the implementation of the control series of the active experiment.

The analysis of the basic regression equations shows that the most important influences on the strength of the foam glass are its characteristics (ratios at X_1 and X_2) and its flow rate (ratio at X_3), as well as the pair effect of the flow rate and particle size (ratio at X_2X_3). Also significant is the content of the fluent component (coefficient at X_4). The nature of this influence can be explained by the structure of the resulting material (Fig. 2). The corrective action of malting glass as a fluxing component that lowers the temperature of the ceramic skull, which makes it possible to spin foam glass particles from the ceramic matrix without breaking (melting) the particles of foam glass and their preservation of the porous structure of the burned material. The average density of the material and its thermal conductivity are determined by the characteristics and flow rate of the crushed foam (polynomials 2 and 3).

The values of the coefficients of polynomial 1 allow to deduce the extreme influence of the particle size of the foam glass and the flow rate of the fluid component on the strength of the product (coefficients at X_3^2 and X_4^2 are equal to $-0,4$ and $-0,3$, respectively). Taking into account that testing of polynomials (1-3) according to the F-criterion has shown their adequacy both as statistical polynomials and as algebraic models, it is possible to apply methods of algebraic analysis of nonlinear functions of four variables for their study. This makes it possible and useful to use the analytical optimization method.

Factor X_3 optimization (average particle size of fosterol)

1. Determine the private derivative function $Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4)$ by variable X_3 , equate the result with 0 and find the optimal value of the mean particle size of the foam glass (d_n):

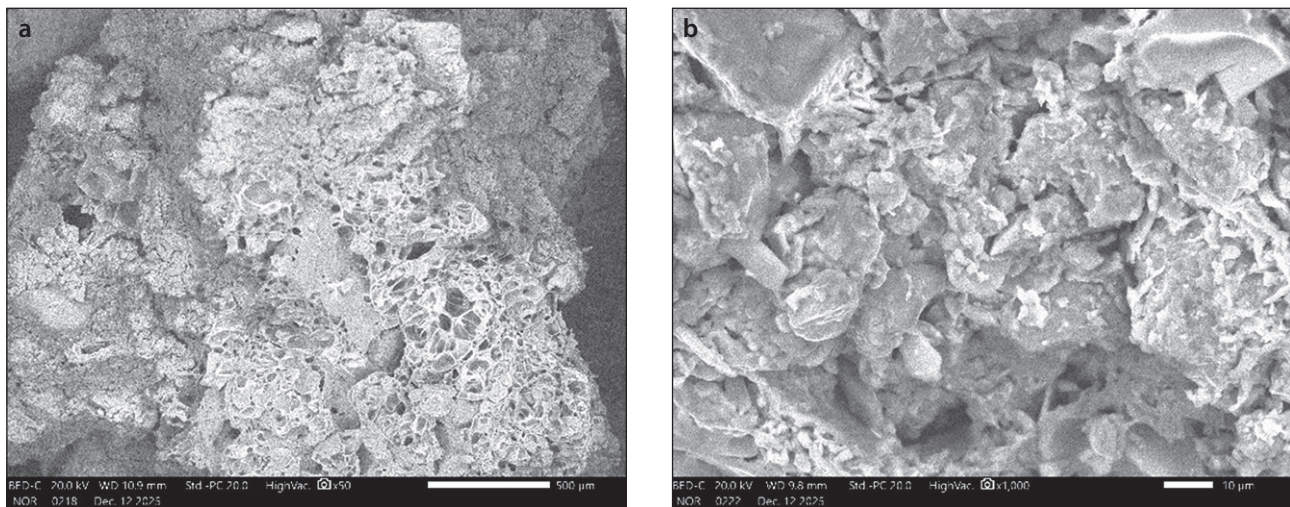


Fig. 2. Structure of material (a) and ceramic skull (b) when enlarged: a – 50 times; b – 1000 times

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0.7 - 0.8X_3 \Rightarrow X_3 = 7/8 = 0.88.$$

Determine the natural value of the optimal size of a part of the foam glass by using the data from table 1:

$$d_{\text{н}} = 0.5 + 0.88 \times 0.2 = 0.68 - 0.69 \text{ mm.}$$

2. Determine the private derivative function $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ by variable X_4 , equate the result with 0 and find the optimal flow rate of the fluid component (P_{ϕ}):

$$\partial Y_1 / \partial X_4 = 0.5 - 0.6X_4 \Rightarrow X_4 = 5/6 = 0.83.$$

The natural value of the flow rate of the fluxing component (fluxing agent) is determined using the data from Table 1:

$$P_{\phi\kappa} = 10 + 0.83 \times 2 = 8.3 - 8.4 \% \text{ from the mass of clay.}$$

3. We optimize algebraic polynomials (1–3) according to the optimal particle size of the foam glass and the fluxing component content, and we obtain optimized models:

$$Y_1 = 14,1 + 0,8X_1 - 1,2X_2; \quad (4)$$

$$Y_2 = 1390 + 18X_1 - 37X_2; \quad (5)$$

$$Y_3 = 144 - 14X_1 - 7X_2 - 4X_1X_2. \quad (6)$$

Dependencies (Formulas 4–6) became the basis for forming a nomogram (Fig. 2). Variable factors are mean density and foam flow rate; mean particle size of the foam and fluid content have fixed optimization values. In the nomogram sectors, a relationship is established between the response function and varying factors: in

sector I – for medium density of burnt ceramics; in sector II – for strength to compression; in sector III – for heat conductivity. Average particle size of the foam glass 0.68–0.69 mm; concentration of the fluxing component = 8.3–8.4% of clay mass.

The mean value of the result (mathematical expectation) was determined, and deviation from the mean (spread of results or discount) was taken to be closer to the normal distribution (Gauss distribution). Using a nomogram (Fig. 3), the direct task of digital modeling (predicting product properties by specified values of variable factors) is solved graphically. The inverse problem (determination of optimal values of factors) is solved analytically and as a result of the implementation of the control series of the experiment.

According to product properties predictions derived from the nomogram (Fig. 3). Control formulae (active control experiment) were carried out, the results of which are presented in the Table 2. The average density and the flow rate of foam glass varied; the particle size of the foam glass and the content of the fluxing agent were taken at an optimal level. The compressive strength of samples was taken as a parameter for evaluation.

The test series of the in-situ experiment allowed the following conclusions to be drawn. First, the mean error, that is, the difference between calculated and experimental values does not exceed 1.6%, which confirms the model's adequacy and the validity of the results obtained. Second, the best strength values correspond to the conditions of experiment No. 7; calculated strength from equation (4) – 15.9 MPa, experimental – 16.1 MPa; $\Delta = 1.3\%$.

The optimal values of factors are as follows. Variable in the experiment: average density of foam glass 150 kg/m³; flow rate of foam glass 30 kg/m³; optimal particle size of ground foam glass 0.68–0.69 mm; fluid content (melt) 8.3–8.4% of clay mass. The following sample character-

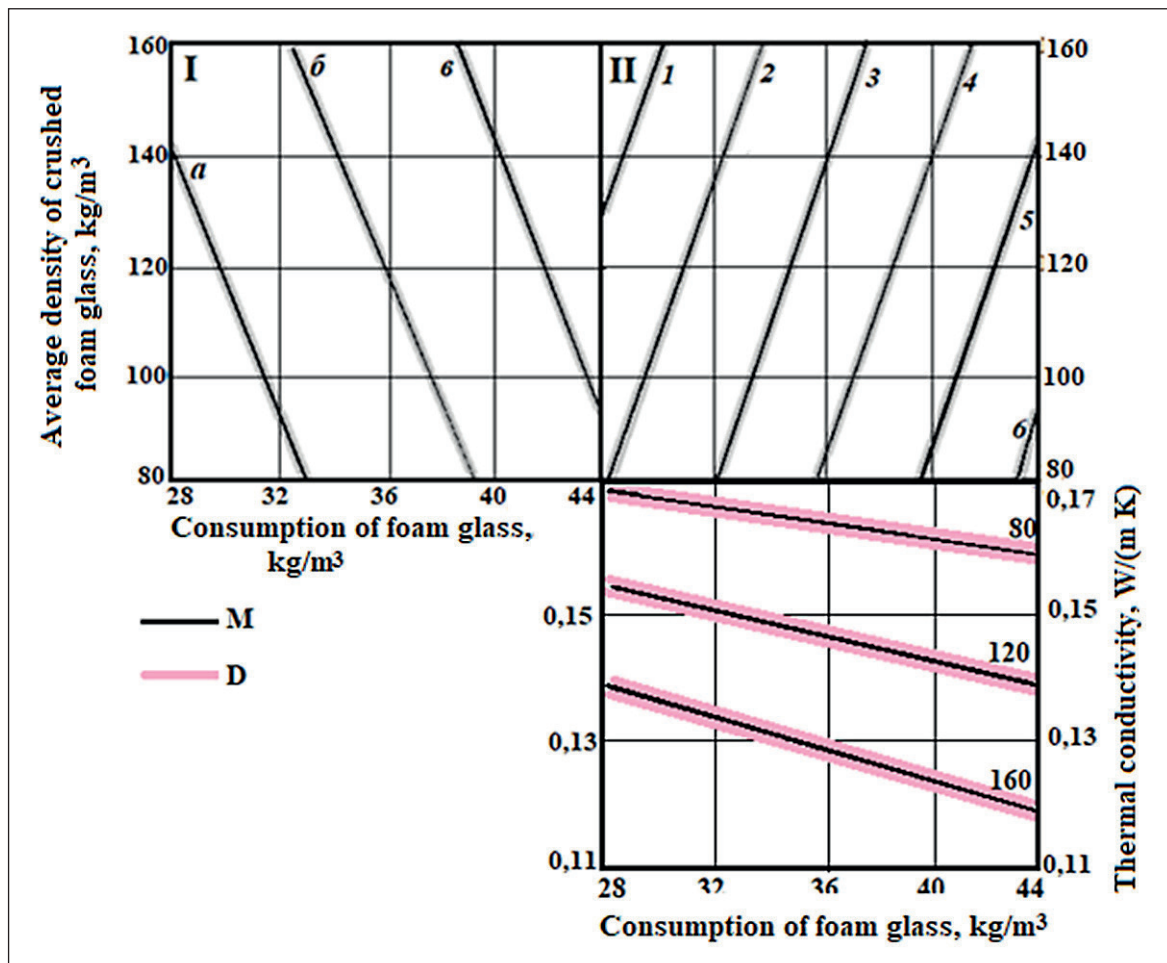


Fig. 3. A nomogram for predicting parameters and selecting the composition of products with an optimal particle size of 0.68–0.69 mm foam and a melt content of 8.3–8.4% of clay mass. Mean density, kg/m³: a – 1320; b – 1360; in – 1400. Compressive strength, MPa: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13; mean density of the foam, kg/m³: 80, 120, 160; M – mean result (mathematical expectation); D – deviation from mean value

Table 2. Test results

Experience No.	Conditions of the experiment		Compressive strength, MPa		Error Δ, %
	Average density of foam glass, kg/m ³	Foam glass consumption, kg/m ³	Calculated	Experimental	
1	150	42	13.7	13.5	1.5
2	120	42	13.0	13.2	1.5
3	90	429	12.3	12.5	1.6
4	150	36	14.8	14.6	1.4
5	120	36	14.1	14.4	2.2
6	90	36	13.4	13.6	1.5
7	150	30	15.9	16.1	1.3
8	120	30	15.2	15.0	1.4
9	90	30	14.5	14.2	2.1
Average Δ, %					1.6

istics correspond to these values: average density 1320–1360 kg/m³; compressive strength 15–16 MPa; thermal conductivity 0.15–0.16 W/(m °C). Separately, the brand was determined by frost resistance: F35.

The laboratory-generated samples have properties that are quite suitable for structural and thermal insulation materials. The next stage of research will be testing in the conditions of existing production, as well as developing recommendations for the use of light ceramics and exploring the possibility of heat-insulating and structural ceramic products of lower density. Light bricks can be used in wall cladding, but are not recommended for foundations. It is possible to make ceramic products both full-length and with voids, as well as the production of modular ceramic bricks and large-format ceramic stones.

CONCLUSION

The use of digital methods in the design and processing of an experiment can significantly reduce the amount

of material needed and the volume of research without compromising on results. It is mandatory to check the data obtained in a control experiment.

The following factors have been accepted as optimal in the results of the studies. Variable in the experiment: average density of foam glass 150 kg/m³; flow rate of foam glass 30 kg/m³; optimal particle size of ground foam glass 0.68–0.69 mm; fluid content (melt) 8.3–8.4% of clay mass. The following sample characteristics correspond to these values: average density 1320–1360 kg/m³; compressive strength 15–16 MPa; thermal conductivity 0.15–0.16 W/(m °C); frost resistance mark: F35.

As a result of the research, the foundations of methods for predicting properties of ceramic articles have been developed, requirements for optimizing properties of foam glass, as well as for costs of foam glass and fluxing component have been formed. The resulting materials fully meet the requirements for structural and thermal insulation products. Lightweight foam glass based brick can be used in thermal efficient wall cladding. The use of light bricks in fundamentals is not recommended.

REFERENCES

1. Gagarin V.G. Macroeconomic aspects of the justification of energy-saving measures in increasing the heat protection of building enclosures. *Construction materials*. 2010;3:8-16.
2. Lesovik V.S. *Building materials and products: study manual. in the direction 270100 "Construction"* [Text] / V.S. Lesovik, A.M. Gridchin, N.I. Alfimov. Belgorod: Published by BGT, 2011.
3. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinovyeva E.A. Ceramic bricks, stones and solid brick walls. *Building materials*. 2019; 9:8-13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
4. Zavadsky V.F., Putro N.B. *Portised building ceramics*. Novosibirsk: Sibstrin; 2005.
5. Hammel E.C., Ighodaro O.L.R., Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application-based review. *Ceramics International*. 2014; 40(10): 15351–15370. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095>
6. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses. *Applied Sciences*. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165714>
7. Kudryavtsev P.G. Main ways of creating porous composite materials. *Nanotechnologies in construction*. 2020;12:5.256269. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269>
8. Li H., Li C., Wu L. et al. In-situ synthesis and properties of porous cordierite ceramics with adjustable pore structure. *Ceramics International*. 2020; 46(10): 14808–14815. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.005>
9. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composites. *Nanotechnologies in construction*. 2018;10(4):75-100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>
10. Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rahimova O.N., Khalykov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramic for construction purposes: technology of production and application. *Nanotechnologies in construction*. 2021;13(4): 213-221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>
11. Shagataev S., Ibragimov T. *Preparation of Porous Ceramic Building Decoration Materials by Foaming Method and Research on Nanomechanical Properties*. Hindawi; 2022. <https://doi.org/10.1155/2023/9897809>
12. Long X., Deng Y. Glass-Ceramic Foams from Weak Alkali Activation and Gel-Casting of Waste Glass. *Fly Ash Mixtures*. PMC; 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12040588>
13. Baykov I.R., Smorodova O.V., Trofimov A.Yu., Kuznetsova E.V. Experimental study of nano-insulation materials based on aerogels. *Nanotechnologies in construction*. 2019; 11(4): 462-477. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477>

14. Kukxa P.B., Akberov A.A. Highly porous ceramic products obtained by a non-traditional method. *Construction materials*. 2004;2:34-35.
15. Suvorova O.V., Manakova N.K. Recycling of mining waste from the Kola peninsula with the production of pelletized porous material. *Ecology of industrial production*. 2014;1:2-5.
16. Sushkevich, K., et al. *Heat-insulating porous material based on glauconite-containing sands and aleurites of the Novodvorskoye deposit of the Republic of Belarus*. Vestichem; 2021. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-463-471>
17. Pilipenko A.S., Kaddo M.B., Asamatdinov M.O., Turganbaev B.B. Warm ceramics based on local raw materials of the Republic of Karakalpakstan. *Construction materials*. 2022;11:86-91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
18. Homeishi F. *Foam Glass and Foam Materials Based on Ash-Slag Wastes from Thermal Power Plants*. Review. SpringerLink; 2019. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00162-x>
19. Koldomasova I.V., Kozlov A.V., Kaklyugin A.V. *Large-size cellular ceramic materials using an aluminosilicate microsphere expander and mineral fibers*. "Construction-2005": International materials. scientific - published by Rostov-on-D: The growth of the state is being built, born 2005.
20. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composite materials. *Nanotechnologies in construction*. 2018;10(4):75-100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>
21. Sapelin A.N. Sorption properties of wall materials using the microsphere. Academia. *Architecture and construction*. 2013;3:101-104.
22. Fomina O.A., Stolboushkin A.Y. Firing of cellular ceramics from granulated foam-glass. *Materials Science Forum*. 2020; 992 265-270. <https://doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.265>
23. Zhuk P.M., Zhukov A.D. The regulatory framework for the environmental assessment of building materials: prospects for improvement. *Ecology and industry of Russia*. 2018; 22 (4):52-57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-52-57>
24. Hanifen N., Alshaaer M., Mijinyawa Y. Preparation and Characterization of Glass-Ceramic Foam from Clay-Rich Waste Diatomaceous Earth. *Materials*. 2022;15:4. <https://doi.org/10.3390/ma15041384>
25. Jianhua Zhao, Shuo Feng, John Grunewald, Frank Meissner, Jiehui Wang. Drying characteristics of two capillary porous building materials: Calcium silicate and ceramic brick. *Building and Environment*. 2022;109006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109006>
26. Stanevich V.T. *Construction ceramics: textbook / V.T. Stanevich - Pavlodar : Kereku, 2008. — 96 pp. ISBN 9965-583-89-7.*
27. Gorbunov G.I., Zhukov A.D. *Scientific foundations of formation of structure and properties of building materials* [Electronic resource]: monograph. Electron. dan. et prog. (11 Mb). Moscow: MSUCE; 2016. ISBN 978-5-7264-1318-1
28. Borrelli A., D'Amore M. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
29. Stolboushkin, A.Yu., Fomina, O.A. The influence of firing temperature on the structure of cellular ceramics with glass crystal framework. *Construction material*. 2019;4: 20-26.
30. Stolboushkin A.Yu., Isterin E.V., Fomina O.A. Need to improve the efficiency of ceramic materials with a matrix structure for exterior walls of buildings. *Construction materials*. 2022; 8: 4-11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-4-11>
31. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demisse B.A. Application of statistical methods to solve problems of building materials science. *Nanotechnologies in construction: a scientific internet journal*. 2020; 12(6):313-319. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>
32. Bessonov I.V. Modeling the structure of highly porous materials / Bessonov I.V., A.D. Zhukov, I.S. Govrjakov, E.A. Gorbunova. *Housing construction*. 2024;6:36-42. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>
33. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Говряков И.С. Optimization of properties and structures of special materials with the application of digital methods. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(2):109-118. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118>. — EDN: WXZIJJ
34. Zhukov A.D., Artemenko S.O., Zhuk P.M., Bobrova E.Yu., Medvedev A.A. Low-energy binder for products based on stone wool. *Nanotechnologies in construction*. 2025.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that no generative artificial intelligence or AI-based technologies were used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey D. Zhukov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation; leading researcher Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 127238, Moscow, Lokomotivny Avenue, 21, Russian Federation; Corresponding Member of the Russian Engineering Academy, 125009, Moscow, Gazetny Lane, 9, pp. 4, lj211@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

Daniil R. Nikolaev – postgraduate student of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation; specialist of project management department of “SHUKO International Moscow”, 141402, Khimki, Leningrad Street, 39/5, Russian Federation, nikolaev.daniil.2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7216-7152>

Petr M. Zhuk – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Architectural Materials Science, Moscow Institute of Architecture, 107031, Moscow, St. Nativacka, 11, pp. 2, Russian Federation, peter_05@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6257-4710>

Andrei A. Medvedev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation; Sub-professor of the Department of Geophysics, Russian Geologic Exploration University, 117485, Moscow, ul. Mikluho-Maclaiya, 23, Russian Federation, medvedev747@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-2606>

Boris A. Efimov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation, boris.alexandr.efimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8438-6742>

Ekaterina Yu. Bobrova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor at the Faculty of Urban and Regional Development, National Research University “Higher School of Economics”, 109028, Moscow, Pokrovsky Blvd., 11 pp. 10, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Building Testing, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation; Corresponding Member of the Russian Engineering Academy, 125009, Moscow, Gazetny Per., 9, pp. 4, mla-gasis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6541-4552>

AUTHORS' CONTRIBUTIONS:

Alexey D. Zhukov – scientific guidance, development of the concept of research, writing the source text;

Daniil R. Nikolaev – implementation of the experiment and processing of its results, including with the use of digital methods;

Petr M. Zhuk – literary review, intermediate conclusions, adaptation of the method to the objectives of the study;

Andrey A. Medvedev – development of modeling methodology and optimization of digital solutions;

Boris A. Efimov – analytical processing of literary review;

Ekaterina Yu. Bobrova – development of research methodology, final conclusions, general editing and refinement of the text.

The authors state that there is no conflict of interest.

The article was submitted 06.03.2026; approved after reviewing 08.04.2026; accepted for publication 12.04.2026.

Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов

Алексей Дмитриевич Жуков^{1,5} , Даниил Романович Николаев¹ , Петр Михайлович Жук² , Андрей Александрович Медведев^{1,4} , Борис Александрович Ефимов¹ , Екатерина Юрьевна Боброва^{1,3*} 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

² Московский архитектурный институт, Москва, 107031, Москва, ул. Рождественка, 11, стр. 2, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, 109028, Москва, Покровский бул., 11, стр. 10, Российская Федерация

⁴ Московский геологоразведочный университет, Москва, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация

⁵ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение эффективности керамического кирпича и камней связано со снижением средней плотности изделий и соответствующей теплопроводностью. Одним из возможных путей является поризация структуры керамического изделия с помощью выгорающих добавок или введения специальных пен при приготовлении керамической смеси. Другая возможность связана с введением в структуру особо легких заполнителей и, в частности, дробленого пеностекла. Целью исследований являлась разработка методики определения и оптимизации рецептур легкого керамического кирпича, основанная на нормативных требованиях по прочностным характеристикам, плотности и теплопроводности. **Методы и материалы.** В качестве сырья использовались суглинок средней пластичности и флюсующий компонент (тонкомолотый бой стекла), а также измельченный пеностекляный щебень. Свойства образцов определялись по нормативным методикам, при планировании и обработке результатов эксперимента использовались статистические и цифровые методы. **Результаты.** Установлено, что оптимальными являются сушка при 80 °С и влажности воздуха 55% и обжиг в интервале температур 900–950 °С при условии введения флюсующего компонента. Установлено, что оптимальными являются значения факторов: средняя плотность пеностекла 150 кг/м³; расход пеностекла 30 кг/м³; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла 0,68–0,69 мм; содержание флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют: средняя плотность 1320–1360 кг/м³; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность 0,15–0,16 Вт/(м·°С); марка по морозостойкости: F35. **Обсуждение.** Применение цифровых методов позволило установить характер влияния варьируемых факторов на свойства материала: его прочность, плотность и теплопроводность, что было подтверждено при проверке адекватности моделей как в сериях активного эксперимента, так и при исследовании структуры материала. **Заключение.** Разработаны основы методики прогнозирования свойств керамических изделий и подбора его состава с помощью цифровых методов, сформированы требования по оптимизации свойств изделий из пеностекла, а также по расходам пеностекла и флюсующего компонента. Полученные материалы вполне соответствуют требованиям к изделиям. Легкий кирпич является конструктивно-теплоизоляционным и может использоваться как стеновой материал.







КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: керамический кирпич, дробленое пеностекло, бой стекла, цифровая оптимизация, статистическое планирование

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования проводились в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН № 3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолегких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России. Исследования проводились на экспериментальной базе ЗАО РОКВУЛ. Часть исследований выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Жуков А.Д., Николаев Д.Р., Жук П.М., Медведев А.А., Ефимов Б.А., Боброва Е.Ю. Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods

Alexey D. Zhukov^{1,5} , Daniil R. Nikolaev¹ , Petr M. Zhuk² , Andrey A. Medvedev^{1,4} , Boris A. Efimov¹ , Bobrova Ekaterina Yu. Bobrova^{1,3*} 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

² Moscow Institute of Architecture, 107031, Moscow, St. Nativacka, 11, pp. 2, Russian Federation

³ National Research University "Higher School of Economics", 109028, Moscow, Pokrovsky Blvd., 11 pp. 10, Russian Federation

⁴ Russian Geologic Exploration University, 117485, Moscow, ul. Mikluho-Maclaiya, 23, Russian Federation

⁵ Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 127238, Moscow, Lokomotivny Proezd, 21, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: mla-gasis@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Improving the efficiency of ceramic bricks and blocks involves reducing their average density and corresponding thermal conductivity. One possible approach is to introduce porosity into the ceramic structure using burnable additives or specialized foams during the preparation of the ceramic mixture. Another option is incorporating ultra-lightweight aggregates, particularly crushed foam glass. The aim of this study was to develop a method for determining and optimizing the formulations of lightweight ceramic bricks based on regulatory requirements for strength characteristics, density, and thermal conductivity. **Methods and materials.** The raw materials used included medium-plasticity loam, a fluxing component (finely ground glass waste), and crushed foam glass gravel. The properties of the samples were assessed using standardized methods, while statistical and digital techniques were employed for experimental planning and data processing. **Results.** It was found that the optimal conditions include drying at 80 °C and 55% air humidity, followed by firing at 900–950 °C with the introduction of a fluxing component. The optimal values of the factors were determined as follows: foam glass density: 150 kg/m³; foam glass consumption: 30 kg/m³; optimal particle size of crushed foam glass: 0.68–0.69 mm; fluxing additive content: 8.3–8.4% of the clay mass. These parameters correspond to the following material properties: Average density: 1320–1360 kg/m³; Compressive strength: 15–16 MPa; Thermal conductivity: 0.15–0.16 W/(m·°C); Frost resistance grade: F35. **Discussion.** The use of digital methods revealed the influence of variable factors on the material's properties (strength, density, and thermal conductivity), which was confirmed through model validation in active experiment series and structural analysis of the material. **Conclusion.** This research has established a methodological framework for predicting the properties of ceramic products and optimizing their composition using digital methods. Requirements for optimizing the properties of foam glass based products were determined, including guidelines for the consumption of foam glass and fluxing agents. The resulting materials fully comply with the relevant standards for such products. The lightweight brick exhibits both structural and thermal insulation properties, making it suitable for use as a wall material.

KEYWORDS: ceramic brick, crushed foam glass, glass waste, digital optimization, statistical planning

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out as part of the research work on the topic of the Federal Research Institute of the Russian Academy of Natural Sciences No. 3.1.2.1 "Development of the theoretical foundations for the production of particularly light inorganic building materials and the study of the effect of porous structure on their thermophysical and acoustic characteristics", carried out on behalf of the Ministry of Construction of Russia. The research was conducted at the experimental base of JSC ROCWOOL. Part of the research was carried out at the National Research Moscow State University of Civil Engineering as part of the implementation of the University's Development Program "PRIORITY 2030". Project 3.1 "Scientific breakthrough in the construction industry — new technologies, new materials, new methods".

FOR CITATION:

Zhukov A.D., Nikolaev D.R., Zhuk P.M., Medvedev A.A., Yefimov B.A., Bobrova E.Yu. Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические изделия применяются в строительстве в течение тысячелетий. В конце XX века, с принятием новых теплотехнических норм, керамические стеновые изделия перестали удовлетворять требо-

ваниям по теплопроводности, а кладки — по термическому сопротивлению. Отметим, что кладка кирпичной стены в 2–2,5 кирпича вполне удовлетворяла требованиям комфортности, но новые нормативы оказались недостижимыми для стен из полнотелого кирпича. В связи с этим для большинства регионов

были рекомендованы слоистые кладки, включающие эффективные теплоизоляционные элементы: плитные изделия на основе каменной ваты или экструзионного пенополистирола, при этом стоимость строительства значительно возросла [1–3].

Принятое направление на повышение энергетической эффективности дало стимул развитию технологий керамических изделий, имеющих меньшую плотность при сохранении уровня прочностных характеристик и морозостойкости материалов: пустотных изделий и поризованной стеновой керамики. Изделия легкой керамики имели меньшую теплопроводность, что повышало их теплотехнические характеристики и меньшую массу, что снижало нагрузку на фундамент [4–6]. Получение легких (теплоизоляционно-конструкционных) стеновых материалов могло осуществляться несколькими способами. Во-первых, за счет повышения пустотности изделий до некоторого предела. Во-вторых, за счет поризации изделия на стадиях формования, сушки, обжига. Третий (комбинированный) способ объединял два первых [7–9].

Формирование высокопористого керамического черепка может осуществляться по методу выгорающих добавок, за счет введения древесных опилок или отсева пенополистирола. Вторым по значимости способом является увеличение пористости керамического кирпича за счет создания ячеистой структуры в процессе газообразования или смешения со специальными пенами [10–12]. Как разновидность этого способа может быть рассмотрено получение керамических аэрогелей [13, 14]. Сложности для материалов этой группы обусловлены необходимостью создания специальных пен, а также мягких режимов сушки, то есть при невысоких температурах и скоростях теплоносителя. В противном случае существовала опасность неравномерной усадки и оседания или растрескивания керамического сырца.

Решение проблемы получения легких материалов при сохранении качественных характеристик возможно за счет введения в их состав на стадии приготовления смесей легких наполнителей. В качестве подобного легкого заполнителя могут использоваться гранулированные горнопромышленные отходы различного вида [15, 16], а также отходы тепловых электростанций [17, 18]. Перспективные результаты получены за счет применения особо легких микросфер различной природы [19–21]. В качестве высокопористых наполнителей могут применяться вспученный вермикулит и вспученный перлитовый песок. Перлитовый песок имеет высокое водопоглощение, что значительно увеличивает длительность сушки полуфабриката. Некоторыми исследователями отмечена целесообразность применения обжигового пеностекла [22–24]. Плитное пеностекло

в промышленных масштабах в РФ не производится, но выпускается пеностекольный щебень, целесообразность применения которого обусловлена его относительно невысоким водопоглощением и сопоставимостью характеристик с керамическим черепком.

Технология керамических изделий включает технологические переделы подготовки сырья, формования, сушки и обжига [25–27]. Продолжительность сушки изделий зависит от свойств глиняной смеси, относительной влажности теплоносителя, размера, вида и конфигурации изделия, температурного режима сушки, конструктивных особенностей сушильных устройств. Продолжительность сушки изделий колеблется в промышленных сушилах или сушильных сараях от 2 до 20 сут., а в лабораторных сушильных шкафах от 6 до 48 ч. Температурный режим обжига кирпича и эффективных керамических камней условно разделяется на четыре периода: досушки (температура до 200 °С), подогрева (700–800 °С), собственно обжига (900–1050 °С), остывания (охлаждения до 40–50 °С). В случае использования измельченного пеностекла важным является коррекция температуры спекания керамического черепка, которая может осуществляться за счет введения плавной, в том числе тонкомолотого стеклобоя [28–30].

С учетом данных анализа рецептур и технологий теплоизоляционно-конструкционных изделий строительной керамики сформулирована цель исследований: разработка методики определения и оптимизации рецептур легкого керамического кирпича, которая основана на нормативных требованиях по прочностным характеристикам, плотности и теплопроводности изделий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основными компонентами смеси для изготовления легкого керамического кирпича являются: суглинок, дробленое пеностекло, молотый стеклобой; для коррекции температуры спекания используют тонкомолотые отходы стекла (флюсующий компонент), по своему составу близкие к сырью для производства пеностекла. Подготовка сырьевых материалов осуществлялась согласно общепринятой технологии. Формование керамического кирпича осуществлялось пластическим способом, формовочная влажность массы 22–24%.

Суглинок имеет крупнодисперсную структуру, комковатую текстуру. Легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде. Суглинок относится к группе умеренно пластичного сырья (число пластичности 12–19), малочувствительного к сушке. Суглинок является полиминеральным сырьем. Содержание оксидов SiO_2 и Al_2O_3 соответственно 52–53% и 11–12%; потери при прокаливании 7–8%. Глинистое веще-

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ство представлено каолинитом (6–15%), монтмориллонитом (10–18%), гидрослюдой (5–12%) в качестве примеси присутствует кварц.

Пеностекло – это обжиговый материал средней плотностью от 80 кг/м³ до 200 кг/м³. Для получения теплоизоляционного пеностекла чаще всего применяют стекломассы, по химическому составу близкие к алюмомагнезиальному оконному стеклу. Эти стекла содержат % по массе: SiO₂ 72–73; Al₂O₃ 0,5–1; MgO 3,5–4; CaO 6–6,5; Na₂O 15,5–15,5; SO₃ 0,3–0,5. Стеклольные шихты могут спекаться в температурных пределах: от 600 до 1000 °С. Насыпная плотность щебня из пеностекла 130–170 кг/м³; истинная плотность – 2180 кг/м³; водопоглощение по объему 2,7–4,4%. Теплопроводность в сухом состоянии составляет 0,08 Вт/(м·°С); приращение теплопроводности на 1% влажности – 0,001 Вт/(м·°С).

Реализация поставленной цели основывалась на решении следующих задач. Во-первых, необходимо было изучить закономерности сушки проектируемых изделий. Во-вторых, с применением статистических методик изучить влияние рецептурных параметров на свойства изделий. В-третьих, с использованием цифровых методов разработать методику оптимизации состава легкого керамического кирпича.

Теоретически процесс сушки характеризуется тремя периодами: нагревом, постоянной и падающей скоростями сушки. В реальных изделиях за счет геометрического фактора и в условиях контакта те-

плоносителя с изделием в пяти плоскостях (одна ложка плоскость прилегает к поддону) период постоянной скорости сушки может быть слабо выраженным.

Общая динамика процесса сушки приведена на рис. 1. Усадка изделий по длине и ширине не велика, поэтому следует считать, что изделия имеют ограниченную чувствительность к сушке. Зависимость продолжительности сушки от температуры и скорости теплоносителя позволяет применять более жесткие режимы по сравнению с пенокерамикой. Начальная температура теплоносителя, с одной стороны, интенсифицирует процесс сушки, а с другой, оказывает влияние на качество изделий. При температуре теплоносителя до 80 °С усадка образцов не превышает 6%, и изделия сохраняют высокое качество.

Образцы изготавливались размерами 50×50×50 мм. Сушка осуществлялась в лабораторном сушильном шкафу при температуре 80 °С и относительной влажности среды 50–55%; срок сушки – 12 час. Обжиг изделий осуществляли в муфельной печи при расчетной температуре 900–950 °С. Режим обжига: поднятие температуры от 18 до 100 °С – 15 мин, выдержка при 100 °С – 10 мин, поднятие температуры до 650 °С – 120 мин, выдержка при температуре 650 °С – 60 мин, поднятие температуры до расчетной 120 мин, выдержка при расчетной температуре – 120 мин; естественное остывание в печи.

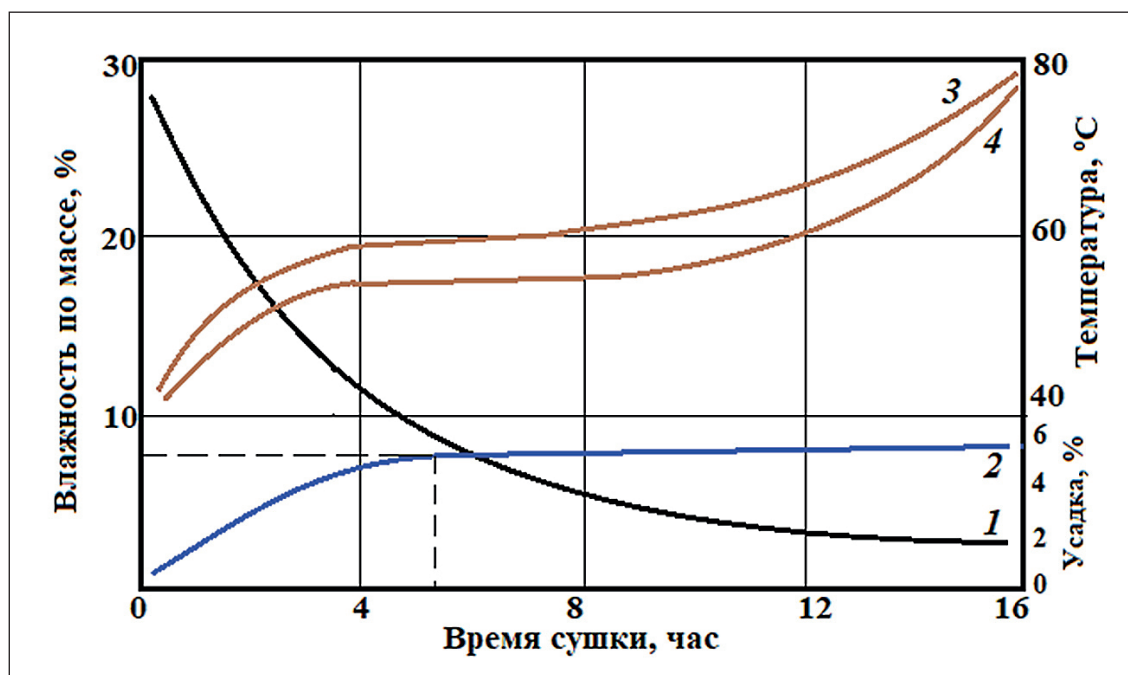


Рис. 1. Сушки керамических образцов на пеностекле (характеристики теплоносителя: температура 80 °С, относительная влажность 40 %): 1 – кривая сушки; 2 – сушильная усадка; 3, 4 – температура верх и середины образца

Основной методологии исследования влияния характеристики пеностекла и флюсующего компонента на свойства изделий были цифровые методики планирования и обработки результатов эксперимента [31, 32], а также метод аналитической оптимизации, разработанный в НИУ МГСУ и опробованный при решении рецептурных и технологических задач для многих видов строительных материалов [33, 34].

В качестве варьируемых факторов приняты характеристики измельченного пеностекла: средняя плотность (X_1), расход (X_2) и средний размер частиц (X_3), а также расход тонкоголового боя стекла как флюсующего компонента (X_4). В качестве функций отклика – прочность изделия при сжатии (Y_1 , МПа), его средняя плотность (Y_2 , кг/м³) и теплопроводность в сухом состоянии ($Y_3 = \lambda \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·°С)). Значения функций отклика определялись по методикам ГОСТ 530-2012.

После проведения предварительных серий экспериментов были определены оптимальные условия тепловой обработки и установлены интервалы варьирования факторов. Условия эксперимента представлены в табл. 1. В эксперименте была принята полная квадратичная матрица D-оптимального плана. В каждой строке плана опыт повторялся 5 раз ($n = 5$). Для снижения вероятности влияния помех и неучтенных факторов использовался метод рандомизации последовательности опытов.

Уравнения регрессии получены в результате обработки экспериментальных данных, которая осуществлялась в программе Statistika. Проверка значимости коэффициентов проводилась по величине доверительных интервалов по прочности и по плотности материала. Величина доверительного интервала определялась по критерию Стьюдента для 5 опытов и дисперсии параллельных опытов. Доверительные интервалы (Δb) составили по прочности – 0,2 МПа, по средней плотности – 9 кг/м³, по теплопроводности – 9 кг/м³, по теплопроводности – 0,004 Вт/(м·°С). Коэффициенты уравнений регрессии, меньшие по абсолютной величине соответствующих значений доверительных интервалов, рассматривались как незначимые и приравнивались к 0.

Таблица 1. Условия трехфакторного эксперимента

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Средняя плотность пеностекла, кг/м ³ (ρ_n)	X_1	120	40	80	160
Расход пеностекла, кг/м ³ (P_n)	X_2	36	8	28	44
Средний размер частиц пеностекла, мм (d_n)	X_3	0,5	0,2	0,3	0,7
Содержание флюсующего компонента, % (C_ϕ)	X_4	10	2	8	12

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам активного эксперимента получены базовые уравнения регрессии. Проверка значимости коэффициентов проводилась по величине доверительных интервалов по прочности и по плотности материала. Величина доверительного интервала определялась по критерию Стьюдента (t-критерия) для 5 опытов ($n = 5$) и дисперсии параллельных опытов. Доверительные интервалы (Δb) составили по прочности – 0,2 МПа, по средней плотности – 9 кг/м³, по теплопроводности – 9 кг/м³, по теплопроводности – 0,004 Вт/(м·°С). Коэффициенты уравнений регрессии, меньшие по абсолютной величине соответствующих значений доверительных интервалов, рассматривались как незначимые и приравнивались к 0.

Базовые уравнения регрессии получены в интервалах изменения варьируемых факторов (табл. 1) для прочности и средней плотности и теплопроводности:

$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7X_3 + 0,5X_4 + 0,6X_2X_3 - 0,4X_3^2 - 0,3X_4^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14X_3 + 8X_2X_3; \quad (2)$$

$$Y_3 = 144 + 14X_1 - 7X_2 + 4X_1X_2. \quad (3)$$

Оценка адекватности на начальном уровне проводилась сравнением расчетных и экспериментальных значений критерия Фишера (F-критерия) и далее в результате реализации контрольных серий активного эксперимента.

Анализ базовых уравнений регрессии показывает, что наибольшее влияние на прочность оказывают характеристики пеностекла (коэффициенты при X_1 и X_2) и его расход (коэффициент при X_3), а также парное влияние расхода пеностекла и размера его частиц (коэффициент при X_2X_3). Значимым также является содержание флюсующего компонента (коэффициент при X_4). Характер подобного влияния можно объяснить структурой получаемого материала (рис. 2). Корректирующее действие молотого

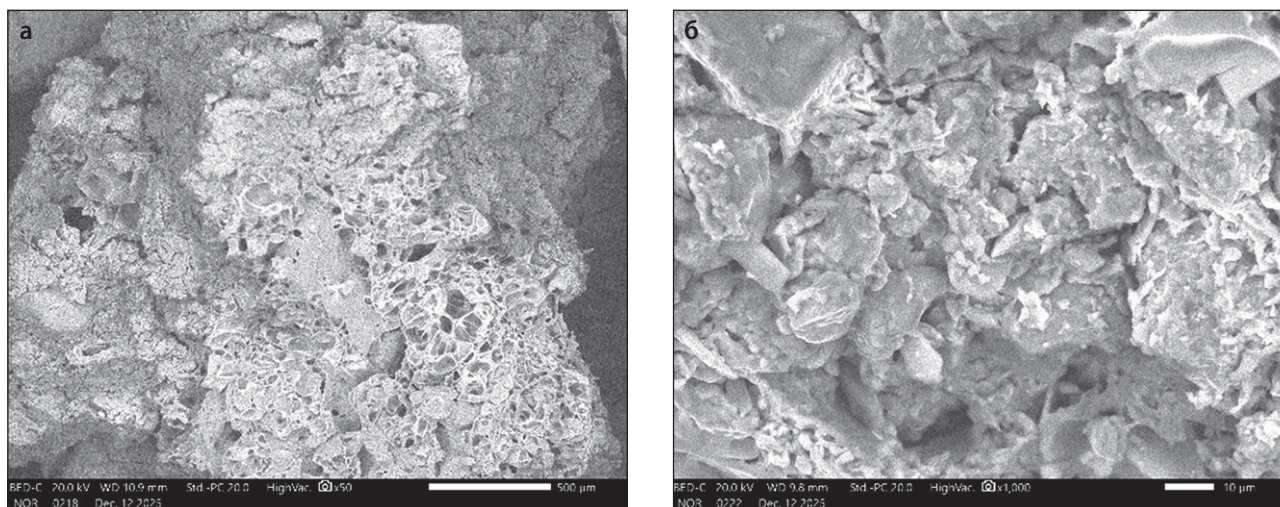


Рис. 2. Структура материала (а) и керамического черепка (б) при увеличении: а – в 50 раз; б – в 1000 раз

стеклобоя как флюсующего компонента, снижающего температуру спекания керамического черепка, что делает возможным спекание частиц пеностекла с керамической матрицей без разрушения (расплавления) частиц пеностекла и сохранения ими пористой структуры обожженного материала. Средняя плотность материала и его теплопроводность определяются характеристиками и расходом дробленого пеностекла (полиномы 2 и 3).

Значения коэффициентов полинома 1 позволяют сделать вывод об экстремальном влиянии размера частиц пеностекла и расхода флюсующего компонента на прочность изделия (коэффициенты при X_3^2 и X_4^2 , равные соответственно $-0,4$ и $-0,3$). С учетом того, что проверка полиномов (1–3) по F-критерию показала их адекватность и как статистических полиномов, и как алгебраических моделей, то для их изучения возможно применение методов алгебраического анализа нелинейных функций четырех переменных. Это делает возможным и целесообразным применение метода аналитической оптимизации.

Оптимизация по фактору X_3 (средний размер частиц пеностекла)

1. Определяем частную производную функции $Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4)$ по переменной X_3 , приравниваем результат 0 и находим оптимальное значение среднего размера частиц пеностекла (d_{II}):

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0,7 - 0,8X_3 \Rightarrow X_3 = 7/8 = 0,88.$$

Натуральную величину оптимального размера части пеностекла определяем, используя данные таблицы 1:

$$d_{II} = 0,5 + 0,88 \times 0,2 = 0,68 - 0,69 \text{ мм.}$$

2. Определяем частную производную функции $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ по переменной X_4 , приравниваем результат 0 и находим оптимальное значение расхода флюсующего компонента ($P_{ф}$):

$$\partial Y_1 / \partial X_4 = 0,5 - 0,6X_4 \Rightarrow X_4 = 5/6 = 0,83.$$

Натуральную величину расхода флюсующего компонента (плавня) определяем, используя данные таблицы 1:

$$P_{фк} = 10 + 0,83 \times 2 = 8,3 - 8,4\% \text{ от массы глины.}$$

3. Осуществляем оптимизацию алгебраических полиномов (1–3) по оптимальным размерам частиц пеностекла и по содержанию плавня и получаем оптимизированные модели:

$$Y_1 = 14,1 + 0,8X_1 - 1,2X_2; \quad (4)$$

$$Y_2 = 1390 + 18X_1 - 37X_2; \quad (5)$$

$$Y_3 = 144 - 14X_1 - 7X_2 - 4X_1X_2. \quad (6)$$

Зависимости (формулы 4–6) стали основой для формирования номограммы (рис. 3). Варьируемыми факторами являются средняя плотность и расход пеностекла; средний размер частиц пеностекла и содержание флюсующего компонента имеют фиксированные значения, полученные в результате оптимизации. В секторах номограммы устанавливается взаимосвязь между функцией отклика и варьируемыми факторами: в секторе I – для средней плотности обожженных керамических изделий; в секторе II – для прочности на сжатие; в секторе III – для теплопроводности. Средний размер частиц пеностекла $0,68-0,69$ мм; содержание флюсующего компонента (плавня) = $8,3-8,4\%$ от массы глины.

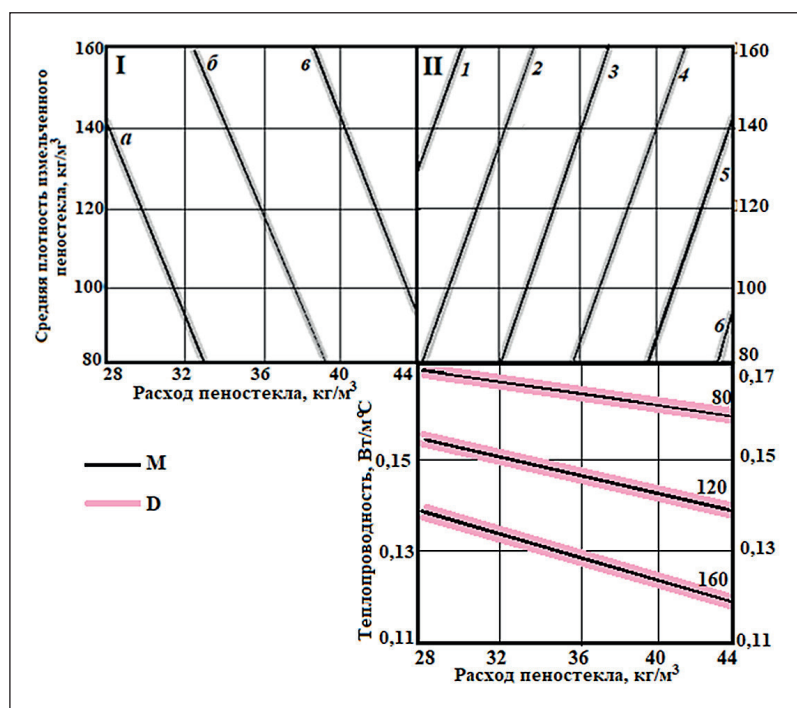


Рис. 3. Номограмма для прогнозирования параметров и подбор состава изделий при оптимальном размере частиц пеностекла, равном 0,68–0,69 мм, и содержании плавня 8,3–8,4% от массы глины. Средняя плотность, кг/м³: а – 1320; б – 1360; в – 1400. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13; Средняя плотность пеностекла, кг/м³: 80, 120, 160; М – среднее значение результата (математическое ожидание); D – отклонение от среднего значения

Определялось среднее значение результата (математическое ожидание), а отклонение от среднего (разброс результатов или дисконт) принимался приближенным к нормальному распределению (распределению Гаусса). С помощью номограммы (рис. 3) прямая задача цифрового моделирования (прогнозировании свойств изделий по задаваемым значениям варьируемых факторов) решается графически. Обратная задача (определение оптимальных значений факторов) решается аналитически и в результате реализации контрольных серий эксперимента.

В соответствии с прогнозами свойств изделий, полученными из номограммы (рис. 3), были проведены контрольные формовки (контрольный активный эксперимент), результаты которого представлены в таблице 2. Варьировались средняя плотность и расход пеностекла; размер частиц пеностекла и содержание плавня принимались на оптимальном уровне. В качестве параметра оценки была принята прочность образцов на сжатие.

Контрольные серии натурального эксперимента позволили сформулировать следующие выводы. Во-первых, средняя ошибка, то есть разница между расчетными и экспериментальными значениями, не превышает 1,6%, что подтверждает адекватность модели и достоверность полученных результатов. Во-вторых, наилучшие прочностные показатели соответствуют условиям эксперимента № 7; расчетная прочность, полученная из уравнения (4) – 15,9 МПа, экспериментальная – 16,1 МПа; $\Delta = 1,3\%$.

Оптимальными приняты следующие значения факторов, варьируемых в эксперименте: средняя

плотность пеностекла 150 кг/м³; расход пеностекла 30 кг/м³; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла, равный 0,68–0,69 мм; содержание флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют следующие характеристики образцов: средняя плотность 1320–1360 кг/м³; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность 0,15–0,16 Вт/(м·°С). Отдельно определялась марка по морозостойкости: F35.

Полученные в лабораторных условиях образцы по своим свойствам вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к конструктивно-теплоизоляционным материалам. Следующим этапом исследований будет апробация в условиях действующего производства, а также разработка рекомендаций по применению изделий легкой керамики, а также изучение возможности теплоизоляционно-конструкционных керамических изделий меньшей плотности. Легкий кирпич может быть использован в кладках стен, но применение его в фундаментах не рекомендуется. Возможно изготовление керамических изделий как полнотельными, так и с пустотами, а также изготовление модульного керамического кирпича и крупноформатных керамических камней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Использование цифровых методик при планировании эксперимента и обработке его результатов позволяет значительно сократить материалоемкость и объемы исследований без ущерба для получаемых результатов. При этом является обязательной про-

Таблица 2. Результаты контрольного эксперимента

№ опыта	Условия эксперимента		Прочность на сжатие, МПа		Ошибка Δ, %
	Средняя плотность пеностекла, кг/м ³	Расход пеностекла, кг/м ³	Расчётная	Экспериментальная	
1	150	42	13,7	13,5	1,5
2	120	42	13,0	13,2	1,5
3	90	429	12,3	12,5	1,6
4	150	36	14,8	14,6	1,4
5	120	36	14,1	14,4	2,2
6	90	36	13,4	13,6	1,5
7	150	30	15,9	16,1	1,3
8	120	30	15,2	15,0	1,4
9	90	30	14,5	14,2	2,1
			Средняя Δ, %		1,6

верка полученных данных в контрольном натурном эксперименте.

По результатам исследований оптимальными приняты следующие значения факторов, варьируемых в эксперименте: средняя плотность пеностекла 150 кг/м³; расход пеностекла 30 кг/м³; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла, равный 0,68–0,69 мм; содержания флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют следующие характеристики образцов: средняя плотность 1320–1360 кг/м³; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность

0,15–0,16 Вт/(м·°С); марка по морозостойкости: F35.

В результате исследований разработаны основы методики прогнозирования свойств керамических изделий, сформированы требования по оптимизации свойств пеностекла, а также по расходам пеностекла и флюсующего компонента. Полученные материалы вполне соответствуют требованиям к конструктивно-теплоизоляционным изделиям. Легкий кирпич на основе пеностекла может быть использован в теплоэффективных кладках стен. Применение легкого кирпича в фундаментах не рекомендуется.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий. *Строительные материалы*. 2010;3:8–16.
2. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Алфимова Н.И. *Строительные материалы и изделия: учеб. пособ. по направлению 270100 «Строительство» Белгород: Изд-во БГТУ*. 2011;222 с. ISBN: 978-5-361-00161-3. EDN: QNPZOB
3. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены *Строительные материалы*. 2019; 9:8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13> EDN: FAPNHW
4. Завадский В.Ф., Путьро Н.Б. Поризованная строительная керамика. – Новосибирск: Сибстрин, 2005. – 100 с. ISBN: 5-7795-0279-X. EDN: QNEAUV
5. Hammel E.C., Ighodaro O.L.R., Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application-based review. *Ceramics International*. 2014;40(10):15351–15370. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095>
6. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses. *Applied Sciences*. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165714>
7. Кудрявцев П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2020;12(5):256–269. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269>. – EDN: АКJMVА
8. Li H., Li C., Wu L. et al. In-situ synthesis and properties of porous cordierite ceramics with adjustable pore structure. *Ceramics International*. 2020;46(10):14808–14815. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.005>
9. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;10(4):75–100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>. – EDN: ХWХTRB
10. Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2021;13(4):213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>. – EDN: WАQMDB

11. Shagataev S., Ibragimov T. *Preparation of Porous Ceramic Building Decoration Materials by Foaming Method and Research on Nanomechanical Properties*. Hindawi; 2022. <https://doi.org/10.1155/2023/9897809>
12. Long X., Deng Y. Glass-Ceramic Foams from Weak Alkali Activation and Gel-Casting of Waste Glass. *Fly Ash Mixtures*. PMC; 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12040588>
13. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных нано материалов 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
14. Кукса П.Б., Акберов А.А. Высокопористые керамические изделия, полученные нетрадиционным способом. *Строительные материалы*. 2004;2:34–35. EDN: IBELZZ
15. Суворова О.В., Манакова Н.К. Утилизация горнопромышленных отходов Кольского полуострова с получением гранулированного пористого материала. *Экология промышленного производства*. 2014;1:2–5. EDN: RURMCV
16. Sushkevich, K., et al. *Heat-insulating porous material based on glauconite-containing sands and aleurites of the Novodvorskoye deposit of the Republic of Belarus*. Vestichem; 2021. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-463-471>
17. Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан. *Строительные материалы*. 2022;11:86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>. – EDN: CNAIGR
18. Homeishi F. *Foam Glass and Foam Materials Based on Ash-Slag Wastes from Thermal Power Plants*. Review. SpringerLink; 2019. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00162-x>
19. Колдомасова И.В., Козлов А.В., Каклюгин А.В. Крупноразмерные ячеистые керамические материалы с использованием алюмосиликатного микросферического наполнителя и минеральных волокон // «Строительство-2005»: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2005. С. 9–10.
20. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;10(4):75–100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>. – EDN: XWXTRB
21. Сапелин А.Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер. *Academia. Архитектура и строительство*. 2013;3:101-104. EDN: RHTVYB
22. Fomina O.A., Stolboushkin A.Y. Firing of cellular ceramics from granulated foam-glass. *Materials Science Forum*. 2020; 992 265-270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.265>.
23. Жук П.М., Жуков А.Д. Нормативно-правовая база экологической экспертизы строительных материалов: перспективы совершенствования. *Экология и промышленность России*. 2018;22(4):52-57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-52-57>. – EDN: YWJROQ
24. Hanifen N., Alshaaer M., Mijinyawa Y. Preparation and Characterization of Glass-Ceramic Foam from Clay-Rich Waste Diatomaceous Earth. *Materials*. 2022;15:4. <https://doi.org/10.3390/ma15041384>
25. Jianhua Zhao, Shuo Feng, John Grunewald, Frank Meissner, Jiehui Wanga Drying characteristics of two ca-pillary porous building materials: Calcium silicate and ceramic brick. *Building and Environment*. 2022;109006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109006>
26. Станевич В.Т. Строительная керамика: учебное пособие / В.Т. Станевич. Павлодар : Керекү, 2008. 96 с. ISBN 9965-583-89-7
27. Горбунов Г.И., Жуков А.Д. Научные основы формирования структуры и свойств строительных материалов [Электронный ресурс] : монография. Электрон. дан. и прогр. (11 Мб). Москва: НИУ МГСУ, 2016. ISBN 978-5-7264-1318-1. EDN: XNAIDR
28. Borrelli A., D'Amore M. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
29. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Влияние температуры обжига на формирование структуры ячеистой керамики со стеклокристаллическим каркасом. *Строительные материалы*. 2019;4:20-26. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-20-26>. – EDN: RFHQDJ
30. Столбоушкин А.Ю., Истерин Е.В., Фомина О.А. Необходимость повышения эффективности керамических материалов с матричной структурой для наружных стен зданий. *Строительные материалы*. 2022;8:4–11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-4-11>. – EDN: SKAFSX
31. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2020;12(6):313–319. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>. – EDN: OISNYO
32. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Моделирование структуры высокопористых материалов. *Жилищное строительство*. 2024;6:36–42. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. – EDN: PFEGZX
33. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):109–118. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118>. – EDN: WXZIJJ
34. Жуков А.Д., Артеменко С.О., Жук П.М., Боброва Е.Ю., Медведев А.А. Малоэнергоемкое связующее для изделий на основе каменной ваты. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(4):377–388. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-377-388>. – EDN: BORGVT.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

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

Жуков Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21., Российская Федерация; член-корреспондент Российской инженерной академии, 125009, Москва, Газетный пер., 9, стр. 4, lj211@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

Николаев Даниил Романович – аспирант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; специалист отдела управления проектами компании «ШУКО Интернационал Москва», 141402, Химки, Ленинградская ул., вл. 39 с. 5, Российская Федерация, nikolaev.daniil.2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7216-7152>

Жук Петр Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Архитектурное материаловедение, Московский архитектурный институт, 107031, Москва, ул. Рождественка, 11, стр. 2, Российская Федерация, peter_05@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6257-4710>

Медведев Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; доцент кафедры геофизики, Российский геологоразведочный университет, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация, medvedev747@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-2606>

Ефимов Борис Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, boris.alexandr.efimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8438-6742>

Боброва Екатерина Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент факультета городского и регионального развития, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, Москва, Покровский бул., 11, стр. 10, Российская Федерация; доцент кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; член-корреспондент Российской инженерной академии, 125009, Москва, Газетный пер., 9, стр. 4, mla-gasis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6541-4552>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Жуков Алексей Дмитриевич – научное руководство, разработка концепции исследования, написание исходного текста;

Николаев Даниил Романович – реализация эксперимента и обработка его результатов, в том числе с применением цифровых методик;

Жук Петр Михайлович – литературный обзор, промежуточные выводы, адаптация методологии к задачам исследования;

Медведев Андрей Александрович – разработка методологии моделирования и оптимизация цифровых решений;

Ефимов Борис Александрович – аналитическая обработка литературного обзора;

Боброва Екатерина Юрьевна – развитие методологии исследования, итоговые выводы, общая редакция и доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 12.04.2026.

Development of artificial hydraulic lime

Valentina I. Loganina^{1*} , Irina A. Garkina¹ , Evgenia V. Tkach² , Irina V. Stepina² 

¹ Penza State University of Architecture and Construction, 440028, Penza, ul. Titov, 28, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. Lime mortars used for the restoration of historical buildings are characterized by low resistance during operation. The durability of lime solutions can be increased by using hydraulic lime as a binder. However, the share of hydraulic lime in the lime binder production structure is only 19.8%. Given the low volume of production of natural hydraulic lime, it is promising to develop a formulation of artificial hydraulic lime. **Materials and methods.** To develop the formulation of artificial hydraulic lime, grade 2 slaked lime (pushonka) with an activity of 64% was used, as well as grade 2 air lime with an activity of 84% (GOST 9179-18). The technology for producing artificial hydraulic lime consisted of mixing slaked lime with pozzolan additives, as well as mixing air lime with pozzolan additives during the quenching process. When developing the formulation of the plaster mortar, quartz sand from various deposits was used as a fine filler. The optimal type of sand was selected based on the strength criterion of calcareous composites and sand activity, characterized by the value of free surface energy. **Results.** It has been established that the most effective is the addition of metakaolin. The compressive strength of the solution at the age of 28 days of hardening is 2.1 MPa when using second-grade quicklime. Increasing the dosage of metakaolin to 40% by weight of lime increases the compressive strength to 2.7–3.1 MPa. Pozzolan additives silica, dehydrated clay, diatomite at a dosage of 10% by weight of lime do not provide the required compressive strength of at least 2.0 MPa. The introduction of Portland cement in the formulation in an amount of 25% by weight of lime contributes to a significant increase in compressive strength, amounting to 2.9–4.0 MPa, depending on the type of additive and type of lime, as well as the technology of binder preparation. The porosity of calcareous stone based on artificial hydraulic lime was determined, amounting to 48–51%, while a decrease in the volume of closed pores was observed. Solutions based on artificial hydraulic lime provide sufficient adhesion strength to the brick substrate, amounting to 0.4–0.55 MPa/kg. It has been established that the use of methakaolin in the amount of 40–50% of the mass of air lime makes it possible to obtain artificial hydraulic lime. The developed compositions of artificial hydraulic lime are proposed to be used for the restoration of buildings of historical buildings, as well as finishing newly erected facilities. **Conclusion.** It has been established that the use of aerial quicklime in the preparation of artificial hydraulic lime promotes a more durable lime composite structure. The porosity of limestone based on artificial hydraulic lime is lower than that of limestone based on aerial lime, and for limestone based on cement-based compositions, it is lower than that of limestone based on hydraulic lime. HL artificial hydraulic lime and plaster mortar formulations based on it have been developed for the restoration of cultural heritage sites and the finishing of new buildings.

KEYWORDS: lime, pozzolan additives, strength, porosity, free energy of the surface

ACKNOWLEDGEMENTS: The work was carried out within the framework of a grant from the Industry Consortium “Construction and Architecture” for fundamental and applied scientific research).

FOR CITATION:

Loganina V.I., Garkina I.A. Tkach E.V., Stepina I.V. Development of artificial hydraulic lime. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

Разработка искусственной гидравлической извести

Валентина Ивановна Логанина^{1*} , Ирина Александровна Гарькина¹ , Евгения Владимировна Ткач² ,
Ирина Васильевна Степина² 

¹ Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Известковые растворы, применяемые для реставрации зданий исторической застройки, характеризуются низкой стойкостью в процессе эксплуатации. Стойкость известковых растворов может быть повышена применением в качестве вяжущего гидравлической извести. Однако в структуре выпуска известкового вяжущего доля гидравлической извести составляет всего лишь 19,8%. Учитывая низкий объем производства натуральной гидравлической извести, перспективной является разработка рецептуры искусственной гидравлической извести. **Материалы и методы.** Для разработки рецептуры искусственной гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) 2 сорта с активностью 64%, а также воздушную известь 2 сорта с активностью 84% (ГОСТ 9179-18). Технология получения искусственной гидравлической извести заключалась в смешивании гашеной извести с пуццолановыми добавками, а также в смешивании воздушной извести с пуццолановыми добавками в процессе гашения. При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений. Выбор оптимального вида песка проводился из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризующей значением свободной поверхностной энергии. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективной является добавка метакаолина. Прочность при сжатии раствора в возрасте 28 суток твердения составляет 2,1 МПа при применении негашеной извести второго сорта. Увеличение дозировки метакаолина до 40% от массы извести повышает прочность при сжатии до 2,7–3,1 МПа. Пуццолановые добавки (микрокремнезем, дегидратированная глина, диатомит) при дозировке 10% от массы извести не обеспечивают требуемой прочности при сжатии, равной не менее 2,0 МПа. Введение в рецептуру портландцемента в количестве 25% от массы извести способствует значительному повышению прочности при сжатии, составляющему 2,9–4,0 МПа в зависимости от вида добавки и вида извести, а также технологии приготовления вяжущего. Определена пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести, составляющая 48–51%, при этом наблюдается уменьшение объема закрытых пор. Растворы на основе искусственной гидравлической извести обеспечивают достаточную прочность сцепления с кирпичной подложкой, составляющую 0,4–0,55 МПа. **Заключение.** Установлено, что применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусственной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита. Выявлено, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Разработаны составы искусственной гидравлической извести НЛ и штукатурного раствора на ее основе, предназначенные для реставрации объектов культурного наследия и отделки вновь возводимых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: известь, пуццолановые добавки, прочность, пористость, свободная энергия поверхности

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнялась в рамках выполнения гранта Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В. Разработка искусственной гидравлической извести. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

INTRODUCTION

One of the challenges facing modern society is the global increase in CO₂ emissions and the associated rise in temperature. The construction industry is one of the largest sources of CO₂ emissions, accounting for over 15% of all greenhouse gas emissions. The cement industry alone accounts for 5–7% of global CO₂ pollution. One solution

to this problem is the wider use of lime mortars. However, lime mortars are characterized by low durability during operation. To increase strength and durability during operation, various modifying additives are added to lime mortar formulations [1–3].

The durability of lime mortars can be increased by using hydraulic lime as a binder. Demand for hydraulic lime has increased in recent years, particularly in connec-

tion with the preservation of historic buildings. Natural hydraulic lime is characterized by compatibility with old masonry, low shrinkage, resistance to salt and frost, and higher deformability and vapor permeability [4–6].

However, hydraulic lime accounts for only 19.8% of total lime binder production. Demand for this type of binder remains limited. The lime market's prospects in the near future will largely be determined by the dynamics of key consumption segments. Considering the low production volume of natural hydraulic lime, the development of a formula for artificial hydraulic lime is promising.

Artificial hydraulic lime can be produced by mixing air-blown lime with pozzolanic additives. Commonly used additives for lime include metakaolin, fly ash, microsilica, ground brick, dehydrated clay, etc. [7–11]. In addition to binary combinations (lime → pozzolan), ternary systems (lime:pozzolan:cement) have proven effective.

The properties of artificial hydraulic lime are influenced by early hardening conditions, including the presence of water, which facilitates the pozzolanic reaction and the transport of CO₂ for subsequent carbonation. The synergistic and competitive effect of these two reactions ensures the level of early strength in pozzolanic systems [12, 13].

The properties of artificial hydraulic lime are significantly influenced by the reactivity of lime and pozzolanic additive, as well as their ratio in the formulation [14]. Too much additive can lead to increased drying shrinkage [15]. Furthermore, the application technology of the mortar plays a fundamental role in the optimal curing of the fresh mortar [16, 17].

An analysis of scientific and technical literature shows that, despite the existing research results, many issues require more detailed consideration when developing a formula for artificial hydraulic lime. The aim of the work is to develop a composition of artificial hydraulic lime and plaster mortar based on it for the restoration of historical buildings.

METHODOLOGY

To develop the recipe for artificial hydraulic lime, slaked lime (fluff) of the 2nd grade with an activity of 64%, as well as air lime of the 2nd grade with an activity of 84% (GOST 9179-18) were used. The technology for obtaining artificial hydraulic lime consisted in mixing slaked lime with pozzolanic additives, as well as in mixing air lime with pozzolanic additives during the slaking process. In the work, diatomite of the Inzenskoye deposit, condensed uncompact microsilica MK-85 ($S_{sp} = 24\,000\text{ m}^2/\text{kg}$) with the content (in % by mass %) were used as a pozzolanic additive: SiO₂ – 92; Al₂O₃ – 0.9; C – 1.6; CaO – 0.85; MgO – 0.4; (YDD Corporation LLP, Kazakhstan), highly active metakaolin VMK-45 ($S_{sp} = 1700\text{ m}^2/\text{kg}$) with the following content (in % by weight): SiO₂ – 53;

Al₂O₃ – 42 and pozzolanic activity of 1210 mg/g (Sinergo LLC, Russian Federation), as well as clay from the Penza region (Belinskoye deposit) heat-treated at 600 °C. The composition of diatomite is represented by the following oxides, %: SiO₂ – 84–87, Al₂O₃ – 5.5–6, Fe₂O₃ 2.5–3, CaO – 0.61. The chemical composition of clays is presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of clay

Name of oxides	Content,%
SiO ₂	59.56
Al ₂ O ₃	11.85
Fe ₂ O ₃	4.54
Other	24.05

White cement PCB 1-500 D0 (GOST 965-89) was also used to develop the composition of artificial hydraulic lime. For comparison, natural hydraulic lime “Tamasli” NHL was used in the study. The hydraulic modulus of this lime is $M = 2.69$.

After molding, the samples were covered with polyethylene film, cured for 7 days, then removed from the mold and conditioned in water for 21 days. The compressive strength of the samples was determined after 28 days of curing in accordance with GOST 9179-2018 “Construction Lime Technical Specifications.”

When developing the plaster mortar formula, quartz sand from various deposits was used as fine aggregate. The optimal sand type was selected based on the strength of limestone composites and the sand's activity, characterized by its free surface energy [18].

The surface free energy (SFE) was determined using the OVRK method. Glycerin and water, each with known surface tension values and their dispersion and polar components, were used as working fluids. The contact angle was measured on tablet samples prepared by pressing sand into a 20 mm diameter metal mold. By extrapolating the dependence $\cos\Theta = f(\sigma_*)$ to $\cos\Theta = 1$, the critical surface tension of a solid surface was obtained. The polar and dispersion components were calculated using linear regression

$$\frac{\sigma_L(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^p} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_L^p}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d}, \quad (1)$$

where σ_L is the surface tension of the working fluids;
 σ_S^d is the dispersion component of the surface tension of the working fluids;

σ_L^p is the polar component of the surface tension of the working fluids;

σ_S^d is the dispersion component of the surface tension of the material being studied;

σ_s^p is the polar component of the surface tension of the material being studied;

θ is the contact angle of the material being studied.

The dispersion component of the surface tension of the studied material (sand) σ_s^d was determined as the tangent of the angle of inclination of the line to the abscissa axis, and the segment intercepted by the line on the ordinate axis is equal to the value of the polar component of the surface tension of sand σ_s^p . At least five measurements were carried out for each sample.

The value of surface energy E was determined by the total surface area of the dispersed sample and was calculated using the following expression

$$E = \sigma S_{sp}, \quad (2)$$

where σ is the surface tension of the quartz filler;
 S_{sp} is the specific surface area of the quartz sand.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 shows the results of the evaluation of the compressive strength of lime mortars.

Table 2. Compressive strength of lime mortar

No.	Type of binder	Compressive strength, MPa
1	Air lime	
2	NHL Hydraulic Lime	2.05
3	Air lime + Portland cement 25%	2.9/3.2
4	Air lime + 10% metakaolin	1.4/2.1
5	Air lime + 40% metakaolin	2.7/3.1
6	Air lime + 10% microsilica	1.2/1.6
7	Air lime + 10% microsilica + Portland cement 25%	3.4/3.7
8	Air lime + diatomite 10%	1.1/1.4
9	Air lime + dehydrated clay 10%	1.3/1.5
10	Air lime + diatomite 10% + Portland cement 25%	3.1/3.5
11	Air lime + 25% cement + 10% metakaolin	3.7/4.0

Note. * Above the line are the values of the compressive strength when using slaked lime, below the line – when using non-slaked lime.

Table 3. Porosity of limestone

No.	Type of binder	Porosity, %	Open pore volume, %	Closed pore volume, %	Water absorption, % by weight
1	Control	60	50	10	44
2	NHL Hydraulic Lime	52	38	14	36
3	Air lime + 10% metakaolin	57	46	11	34.8
4	Air lime + 40% metakaolin	54	41	13	32.7
5	Air lime + 10% microsilica + 25% Portland cement	51	41	10	36
6	Air lime + diatomite 10% + Portland cement 25%	53	43	10	33
7	Air lime + 25% cement + 10% metakaolin	48	39	9	31

For example, the porosity of limestone based on natural hydraulic lime is 52%, while that of mortars with pozzolanic additives and cement is 48–51%, with a decrease in closed pore volume observed.

The kinetics of lime binding with CaO during the hardening process was studied (Fig. 1).

An analysis of the experimental data indicates that the amount of free lime decreases over time. Thus, at 7 days, the amount of free CaO in the control sample was 85%, and at 28 days, 79% (Fig. 1, curve 1). In samples with the addition of metakaolin, the free lime content decreased to 64% by the 28th day of curing (Fig. 1, curve 2), and with the addition of metakaolin and cement, it decreased to 60% (curve 4).

The presence of free lime in hydraulic lime mortar ensures the self-healing of small cracks. This occurs as the lime in the mortar dissolves in water and, through evaporation, moves to the surface. The reaction between calcium hydroxide and atmospheric carbon dioxide gas forms calcite, which fills and seals the cracks.

When developing a plaster mortar formulation, the effect of quartz sand type on mortar strength was as-

essed. A thermodynamic method was used. To evaluate the optimal sand type, artificial hydraulic lime containing air-dried slaked lime and 40% metakaolin was used as a binder. The samples were cured in air-dry conditions. The results are presented in Table 4.

Analysis of the data presented in Table 4 indicates that with increasing surface free energy (SFE) values of quartz sand, an increase in the compressive strength of the limestone composite is observed. Thus, the compressive strength of the limestone composite based on Sura sand, characterized by a higher surface free energy (SFE) value of 70.285 mN/m, is 2.4 MPa, while that based on sand from the Chaadaevskoye deposit, whose surface free energy (SFE) is 62.8 mN/m, is 1.92 MPa

To summarize the above, it should be noted that the optimal sand from the energy point of view is the Sura deposit, which provides higher strength of the limestone composite.

Mortars based on artificial hydraulic lime provide sufficient bond strength to the brick substrate, amounting to 0.4–0.55 MPa (Fig. 2). The bond strength of

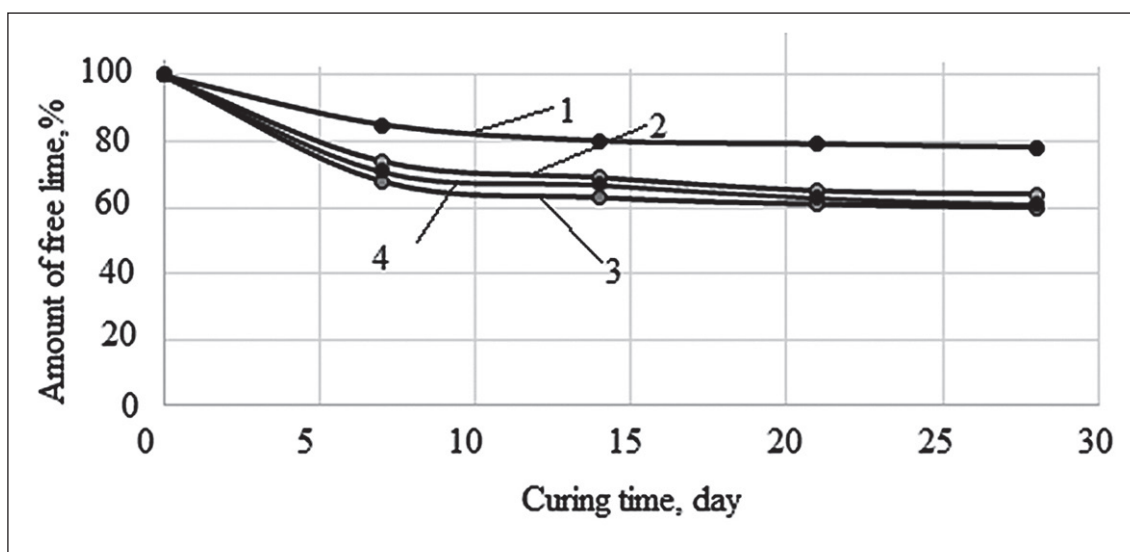


Fig. 1. Kinetics of changes in free CaO concentration in lime compositions: 1 – control lime composition without additives; 2 – artificial hydraulic lime (40% metakaolin additive); 3 – artificial hydraulic lime (10% metakaolin additive + 25% cement); 4 – artificial hydraulic lime (10% microsilica additive + 25% cement)

Table 4. Surface free energy (SFE) values of quartz sands

Name of sand	Polar component of the SEP, s	Dispersion component of the SEP, s	SEP, мДж/м ²	Surface energy, J/kg	Compressive strength, MPa
Rtishchevsky	50.48	18.49	68.97	593.142	2.1
Ramensky	53.08	16	69	614.1	2.3
Nikolsky	50.335	18.49	68.82	557.442	2.0
Sursky	51.79	18.49	70.285	687.106	2.4
Chaadaevsky	48.36	14.44	62.8	436.46	1.92

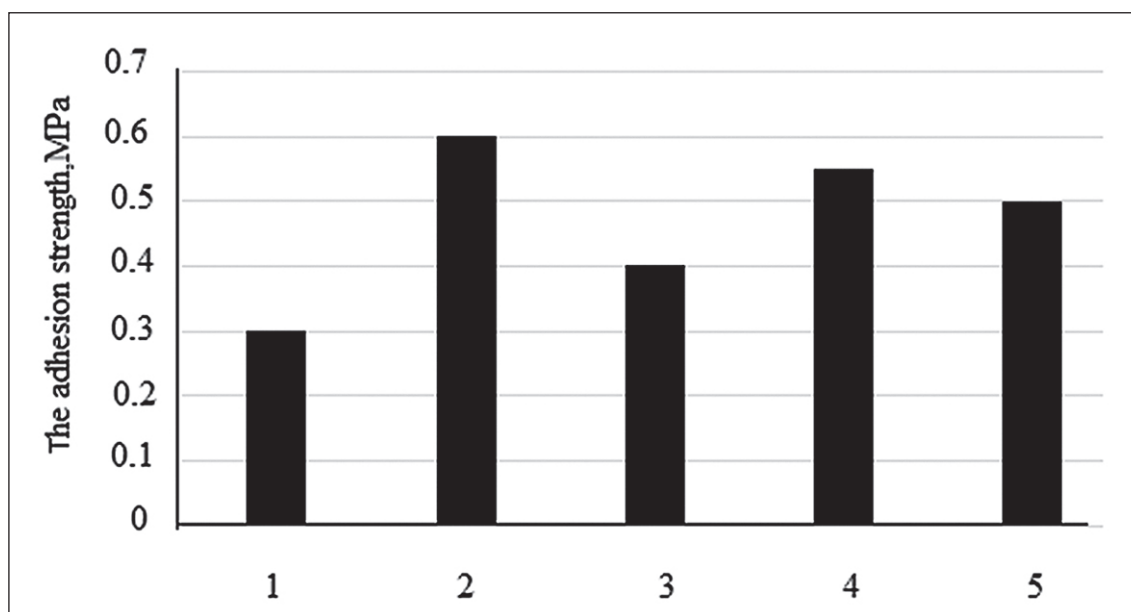


Fig. 2. The adhesion strength of mortar to a brick substrate: 1 – mortar based on air-dried lime; 2 – mortar based on hydraulic lime; 3 – mortar based on air-dried lime + 25% Portland cement; 4 – mortar based on slaked lime + 40% metakaolin; 5 – mortar based on quicklime + 10% metakaolin

mortar based on hydraulic lime is $R_{ad} = 0.6$ MPa. The increase in adhesion strength is explained by the pozzolanic reaction of metakaolin, which enhances the formation of calcium silicate hydrous gel (C–S–H), improving the microstructure and adhesive properties of the solution.

A comparison of the properties of a mortar based on artificial hydraulic lime HL with the properties of a mortar based on natural hydraulic lime NHL shows that the proposed formulation of artificial hydraulic lime meets the requirements of national and international regulatory documents (DIN 18550) in terms of achieving a minimum compressive strength of 2.0 MPa.

CONCLUSION

It has been established that the use of air quicklime in the preparation of artificial hydraulic lime contributes to a more durable formation of the structure of the lime composite. It has been revealed that the porosity of calcareous stone based on artificial hydraulic lime is lower than that of air lime-based stone, and for calcareous stone based on cement compositions – less than that based on hydraulic lime. Compositions of artificial hydraulic lime HL and plaster mortar based on it have been developed, intended for the restoration of cultural heritage sites and the finishing of newly constructed facilities.

REFERENCES

1. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Davydova O.A. Optimization of the composition of composites for general construction purposes modified with nanoscale additives. *Regional architecture and construction*. 2010;2:53-57.
2. Loganina V.I., Davydova O.A., Simonov E.E. Studies of the patterns of the effect of silicic acid sol on the structure and properties of diatomite. *Building materials*. 2011;12:62-65.
3. Pukharensko, Yu.V. Restoration of historical sites using modern dry building mixes / Yu.V. Pukharensko, A.M. Kharitonov, N.N. Shangina, T.Yu. Safonova. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011;1:98-103.
4. Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I., Kilikoglou V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cem. Concr. Res*. 2005;35:1577-1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>
5. Kang S.-H., Lee S.-O., Hong S.-G., Kwon Y.-H. Historical and Scientific Investigations into the Use of Hydraulic Lime in Korea and Preventive Conservation of Historic Masonry Structures. *Sustainability*. 2019;11:5169.

6. Shelikhov N.S. Hydraulic lime and roman cement from the mineral raw materials of Tatarstan / N.S. Shelikhov, R.Z. Rakhimov. *Construction Bulletin of Tatarstan*. 2002;2:48–53.
7. Arizzi A., Cultrone G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Constr. Build. Mater.* 2012;31:135–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069>
8. Aggelakopoulou E., Bakolas, A., Moropoulou A. Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Appl. Clay Sci.* 2011;53:15–19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>
9. Stefanidou M., Tsardaka E.C., Pavlidou E. Influence of nano-silica and nano-alumina in lime-pozzolan and lime-metakaolin binders. *Mater Today Proc.* 2017;4:6908–6922. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.020>
10. Duran A., Navarro-Blasco I., Fernandez J.M. et al. Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica. *Constr Build Mater.* 2014; 58:147–158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.030>
11. Nunes C., Shlykova Z. Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture. *Constr Build Mater.* 2016;114:896–905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.029>
12. Ramenzanianpour A.A., Kazemian N., Sedighi S. et al. Study of durability of mortars with natural pozzolans under carbonation. *J. New Approach Civil Eng.* 2019; 3(3):63–75.
13. Ergenc D., Fort R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO₂ environments. *Constr Build Mater.* 2018; 188:314–325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.125>
14. Navratilova E., Rovnanikova P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Constr Build Mater.* 2016;120:530–539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
15. Shangina N.N., Kharitonov A.M. Features of production and application of dry building mixes for restoration of architectural monuments. *Dry building mixes*. 2011;4:16–19.
16. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Pykin A.A., Panov D.M. Study of pozzolanic activity of highly dispersed wollastonite additive by the Frattini method. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024;9(12):8–17.
17. Tang V.L., Nguyen Z.T.L. Pozzolanic activity of finely dispersed mineral components of various origins in Vietnam. *Silicate Engineering and Technology*. 2021;28(1):7–18.
18. Abramovskaya I.R., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A., Veshnyakova L.A., Tutygin A.S. Energy of highly dispersed composites of rocks. *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2013;3:56–65.

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

Valentina I. Loganina – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Quality Management Department, Penza State University of Architecture and Construction, 440028, Penza, ul. Titov, 28, Russian Federation, loganin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7532-0074>

Irina A. Garkina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mathematics and Mathematical Modeling, Penza State University of Architecture and Construction, 440028, Penza, ul. Titov, 28, Russian Federation, i.a.naum@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3371-3579>

Evgeniya V. Tkach – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Urban Planning, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, tkachev@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>

Irina V. Stepina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, kafSM@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valentina I. Loganina – scientific guidance, sample preparation, determination of specific surface area, collection, analysis and processing of results, writing an article.

Irina A. Garkina – sample production,

Evgeniya V. Tkach – project administration, verification of research results and conclusions.

Irina V. Stepina – literature review.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 04.03.2026; approved after reviewing 05.04.2026; accepted for publication 10.04.2026.

Разработка искусственной гидравлической извести

Валентина Ивановна Логанина^{1*} , Ирина Александровна Гарькина¹ , Евгения Владимировна Ткач² ,
Ирина Васильевна Степина² 

¹ Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Известковые растворы, применяемые для реставрации зданий исторической застройки, характеризуются низкой стойкостью в процессе эксплуатации. Стойкость известковых растворов может быть повышена применением в качестве вяжущего гидравлической извести. Однако в структуре выпуска известкового вяжущего доля гидравлической извести составляет всего лишь 19,8%. Учитывая низкий объем производства натуральной гидравлической извести, перспективной является разработка рецептуры искусственной гидравлической извести. **Материалы и методы.** Для разработки рецептуры искусственной гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) 2 сорта с активностью 64%, а также воздушную известь 2 сорта с активностью 84% (ГОСТ 9179-18). Технология получения искусственной гидравлической извести заключалась в смешивании гашеной извести с пуццолановыми добавками, а также в смешивании воздушной извести с пуццолановыми добавками в процессе гашения. При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений. Выбор оптимального вида песка проводился из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризующейся значением свободной поверхностной энергии. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективной является добавка метакаолина. Прочность при сжатии раствора в возрасте 28 суток твердения составляет 2,1 МПа при применении негашеной извести второго сорта. Увеличение дозировки метакаолина до 40% от массы извести повышает прочность при сжатии до 2,7–3,1 МПа. Пуццолановые добавки (микрокремнезем, дегидратированная глина, диатомит) при дозировке 10% от массы извести не обеспечивают требуемой прочности при сжатии, равной не менее 2,0 МПа. Введение в рецептуру портландцемента в количестве 25% от массы извести способствует значительному повышению прочности при сжатии, составляющему 2,9–4,0 МПа в зависимости от вида добавки и вида извести, а также технологии приготовления вяжущего. Определена пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести, составляющая 48–51%, при этом наблюдается уменьшение объема закрытых пор. Растворы на основе искусственной гидравлической извести обеспечивают достаточную прочность сцепления с кирпичной подложкой, составляющую 0,4–0,55 МПа. **Заключение.** Установлено, что применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусственной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита. Выявлено, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Разработаны составы искусственной гидравлической извести HL и штукатурного раствора на ее основе, предназначенные для реставрации объектов культурного наследия и отделки вновь возводимых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: известь, пуццолановые добавки, прочность, пористость, свободная энергия поверхности

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнялась в рамках выполнения гранта Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В. Разработка искусственной гидравлической извести. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

Development of artificial hydraulic lime

Valentina I. Loganina^{1*} , Irina A. Garkina¹ , Evgenia V. Tkach² , Irina V. Stepina² 

¹ Penza State University of Architecture and Construction, 440028, Penza, ul. Titov, 28, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. Lime mortars used for the restoration of historical buildings are characterized by low resistance during operation. The durability of lime solutions can be increased by using hydraulic lime as a binder. However, the share of hydraulic lime in the lime binder production structure is only 19.8%. Given the low volume of production of natural hydraulic lime, it is promising to develop a formulation of artificial hydraulic lime. **Materials and methods.** To develop the formulation of artificial hydraulic lime, grade 2 slaked lime (pushonka) with an activity of 64% was used, as well as grade 2 air lime with an activity of 84% (GOST 9179-18). The technology for producing artificial hydraulic lime consisted of mixing slaked lime with pozzolan additives, as well as mixing air lime with pozzolan additives during the quenching process. When developing the formulation of the plaster mortar, quartz sand from various deposits was used as a fine filler. The optimal type of sand was selected based on the strength criterion of calcareous composites and sand activity, characterized by the value of free surface energy. **Results.** It has been established that the most effective is the addition of metakaolin. The compressive strength of the solution at the age of 28 days of hardening is 2.1 MPa when using second-grade quicklime. Increasing the dosage of metakaolin to 40% by weight of lime increases the compressive strength to 2.7–3.1 MPa. Pozzolan additives silica, dehydrated clay, diatomite at a dosage of 10% by weight of lime do not provide the required compressive strength of at least 2.0 MPa. The introduction of Portland cement in the formulation in an amount of 25% by weight of lime contributes to a significant increase in compressive strength, amounting to 2.9–4.0 MPa, depending on the type of additive and type of lime, as well as the technology of binder preparation. The porosity of calcareous stone based on artificial hydraulic lime was determined, amounting to 48–51%, while a decrease in the volume of closed pores was observed. Solutions based on artificial hydraulic lime provide sufficient adhesion strength to the brick substrate, amounting to 0.4–0.55 MPa/kg. It has been established that the use of methakaolin in the amount of 40–50% of the mass of air lime makes it possible to obtain artificial hydraulic lime. The developed compositions of artificial hydraulic lime are proposed to be used for the restoration of buildings of historical buildings, as well as finishing newly erected facilities. **Conclusion.** It has been established that the use of aerial quicklime in the preparation of artificial hydraulic lime promotes a more durable lime composite structure. The porosity of limestone based on artificial hydraulic lime is lower than that of limestone based on aerial lime, and for limestone based on cement-based compositions, it is lower than that of limestone based on hydraulic lime. HL artificial hydraulic lime and plaster mortar formulations based on it have been developed for the restoration of cultural heritage sites and the finishing of new buildings.

KEYWORDS: lime, pozzolan additives, strength, porosity, free energy of the surface

ACKNOWLEDGEMENTS: The work was carried out within the framework of a grant from the Industry Consortium “Construction and Architecture” for fundamental and applied scientific research).

FOR CITATION:

Loganina V.I., Garkina I.A. Tkach E.V., Stepina I.V. Development of artificial hydraulic lime. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться современному обществу, является глобальное увеличение выбросов CO₂ и связанное с этим повышение температуры. Строительная отрасль является одним из крупнейших источников выбросов CO₂, на строительную отрасль приходится более 15% всех выбросов парниковых газов. Только на цементную промышленность приходится 5–7% глобального загрязнения CO₂. Одним из способов решения этой

проблемы является более широкое применение известковых растворов. Однако известковые растворы характеризуются низкой стойкостью в процессе эксплуатации. Для повышения прочности, стойкости в процессе эксплуатации в рецептуру известковых растворов вводят различные модифицирующие добавки [1–3].

Стойкость известковых растворов может быть повышена применением в качестве вяжущего гидравлической извести. Спрос на гидравлическую известь возник в последние несколько лет, особенно

в связи с сохранением исторических зданий. Натуральная гидравлическая известь характеризуется совместимостью со старой кладкой, низкой усадочной деформацией, устойчивостью к воздействию соли и мороза, а также более высокой деформативностью и паропроницаемостью [4–6].

Однако в структуре выпуска известкового вяжущего доля гидравлической извести составляет всего лишь 19,8%. Спрос на данный вид вяжущего по-прежнему остается ограниченным. Учитывая низкий объем производства натуральной гидравлической извести, перспективным является разработка рецептуры искусственной гидравлической извести.

Искусственную гидравлическую известь можно получить путем смешивания воздушной извести с пуццолановыми добавками. Обычно используемыми добавками для извести являются метакраолин, зола-унос, микрокремнезем, молотый кирпич, дегидратированная глина и др. [7–11]. Помимо бинарных комбинаций (известь → пуццолан), эффективным оказалось использование тройных систем (известь:пуццолан:цемент).

На свойства искусственной гидравлической извести оказывают влияние условия раннего твердения, учитывающие наличие воды, обеспечивающей пуццолановую реакцию и транспорт CO_2 для дальнейшей реакции карбонизации. Синергетический и конкурентный эффект этих двух реакций обеспечивает уровень ранней прочности в пуццолановых системах [12, 13].

На свойства искусственной гидравлической извести существенное влияние оказывает реакционная способность извести и вид пуццолановой добавки, а также их соотношение в рецептуре [14]. Слишком большое количество добавки может привести к повышенной усадке при высыхании [15]. Кроме того, технология нанесения растворов играет фундаментальную роль в оптимальном созревании свежего раствора [16, 17].

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что, несмотря на имеющиеся результаты исследований, многие вопросы требуют более детального рассмотрения при разработке рецептуры искусственной гидравлической извести.

Целью работы является разработка состава искусственной гидравлической извести и штукатурного раствора на ее основе для реставрации зданий исторической застройки.

МЕТОДОЛОГИЯ

Для разработки рецептуры искусственной гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) 2 сорта с активностью 64%, а также воздушную известь 2 сорта с активностью 84% (ГОСТ

9179-18). Технология получения искусственной гидравлической извести заключалась в смешивании гашеной извести с пуццолановыми добавками, а также в смешивании воздушной извести с пуццолановыми добавками в процессе гашения. В качестве пуццолановой добавки в работе применяли диатомит Инзенского месторождения, микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 ($S_{\text{уд}} = 24\,000 \text{ м}^2/\text{кг}$), с содержанием (в % по масс. %): $\text{SiO}_2 - 92$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.9$; $\text{C} - 1.6$; $\text{CaO} - 0.85$; $\text{MgO} - 0.4$; (ТОО «YDD Corporation», Казахстан), высокоактивный метакраолин ВМК-45 ($S_{\text{уд}} = 1700 \text{ м}^2/\text{кг}$) с содержанием (в % по массе): $\text{SiO}_2 - 53$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 42$ и пуццолановой активностью 1210 мг/г (ООО «Синерго», РФ), а также термообработанную при температуре 600°C глину Пензенского региона (Белинское месторождение). Состав диатомита представлен следующими оксидами, %: $\text{SiO}_2 - 84-87$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,5-6$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 2,5-3$, $\text{CaO} - 0,61$.

Химический состав глин представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав глины

Наименование оксидов	Содержание, %
SiO_2	59,56
Al_2O_3	11,85
Fe_2O_3	4,54
другое	24,05

Для разработки состава искусственной гидравлической извести также применяли белый цемент ПЦБ 1-500 Д0 (ГОСТ 965-89).

Для сравнения в работе применяли природную гидравлическую известь «Тамасли» NHL. Гидравлический модуль извести составляет $M = 2,69$.

После формования образцы накрывали полиэтиленовой пленкой, выдерживали в течение 7 дней, затем извлекали из формы и выдерживали 21 сутки в воде. Прочность образцов на сжатие была определена после 28 дней твердения в соответствии с ГОСТ 9179-2018 «Известь строительная Технические условия».

При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений. Выбор оптимального вида песка проводился из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризуемой значением свободной поверхностной энергии [18].

Для определения значения свободной энергии поверхности (СЭП) применяли метод ОВРК. В качестве рабочих жидкостей применяли глицерин и воду с известными значениями поверхностного натяжения и его дисперсионной и полярной составляющими

ми. Измерение краевого угла смачивания выполняли на образцах-таблетках, изготовленных путем запрессовки песка на прессе в металлическую форму диаметром 20 мм. Экстраполируя зависимость $\cos\theta = f(\sigma_{\text{ж}})$ на $\cos\theta = 1$, получали значение критического поверхностного натяжения твердой поверхности. Полярную и дисперсионную составляющие рассчитывали с помощью линейной регрессии:

$$\frac{\sigma_L(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^P} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_L^P}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d}, \quad (1)$$

где σ_L – поверхностное натяжение рабочих жидкостей;

σ_S^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей;

σ_L^P – полярная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей;

σ_S^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала;

σ_S^P – полярная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала;

θ – краевой угол смачивания исследуемого материала.

Дисперсионную составляющую поверхностного натяжения исследуемого материала (песка) σ_S^d определяли как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, равен значению полярной составляющей поверхностного натяжения песка σ_S^P . Для каждого образца проводили не менее пяти измерений.

Величина энергии поверхности E определялась общей площадью поверхности дисперсного образца и рассчитывалась по следующему выражению:

$$E = \sigma S_{\text{уд}}, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение кварцевого наполнителя;

$S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность кварца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В таблице 2 приведены результаты оценки прочности при сжатии известковых растворов.

Анализ данных (табл. 2) свидетельствует, что по эффективности влияния на прочность известковых композитов наиболее эффективной является добавка метаксаолина. Прочность при сжатии раствора в возрасте 28 суток твердения составляет 2,1 МПа при применении негашеной извести второго сорта. Увеличение дозировки метаксаолина до 40% от массы извести позволяет повысить прочность при сжатии до 2,7–3,1 МПа, что позволяет получить искусственную гидравлическую известь без добавления цемента.

Все остальные пуццолановые добавки при дозировке 10% от массы извести не обеспечивали требуемой прочности при сжатии, равной не менее 2,0 МПа. Введение в рецептуру портландцемента в количестве 25% от массы извести способствует значительному повышению прочности при сжатии, составляющему 2,9–4,0 МПа в зависимости от вида добавки и вида извести, а также технологии приготовления вяжущего.

Применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусственной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита.

Таблица 2. Прочность при сжатии известкового раствора

№ п.п.	Вид вяжущего	Прочность при сжатии, МПа*
1	Воздушная известь	0,9/1,3
2	Гидравлическая известь NHL	2,05
3	Воздушная известь + портландцемент 25%	2,9/3,2
4	Воздушная известь + 10% метаксаолин	1,4/2,1
5	Воздушная известь + 40% метаксаолин	2,7/3,1
6	Воздушная известь + 10% микрокремнезем	1,2/1,6
7	Воздушная известь + 10% микрокремнезем + 25% портландцемент	3,4/3,7
8	Воздушная известь + диатомит 10%	1,1/1,4
9	Воздушная известь + дегидратированная глина 10%	1,3/1,5
10	Воздушная известь + диатомит 10% + портландцемент 25%	3,1/3,5
11	Воздушная известь + 25% цемент + 10% метаксаолин	3,7/4,0

Примечание. * Над чертой приведены значения предела прочности при сжатии при применении гашеной извести, под чертой – при применении негашеной извести.

Таблица 3. Пористость известкового камня

№ п. п.	Вид вяжущего	Пористость, %	Объем открытых пор, %	Объем закрытых пор, %	Водопоглощение, %
1	Контрольный	60	50	10	44
2	Гидравлическая известь NHL	52	38	14	36
3	Воздушная известь + 10% метаксаолин	57	46	11	34,8
4	Воздушная известь + 40% метаксаолин	54	41	13	32,7
5	Воздушная известь + 10% микрокремнезем + 25% портландцемент	51	41	10	36
6	Воздушная известь + диатомит 10% + портландцемент 25%	53	43	10	33
7	Воздушная известь + 25% цемент + 10% метаксаолин	48	39	9	31

В таблице 3 приведены значения пористости известкового камня на основе искусственной гидравлической извести. Результаты исследований показывают, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Так, пористость известкового камня на основе натуральной гидравлической извести составляет 52%, а на основе составов с пуццолановыми добавками и цементом – 48–51%, при этом наблюдается уменьшение объема закрытых пор.

Исследовалась кинетика связывания извести СаО в процессе твердения (рис. 1).

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что с течением времени наблюдается уменьшение количества свободной извести. Так, в возрасте 7 суток количество свободной СаО в контрольном образце составляет 85%, а в возрасте 28 суток 79% (рис. 1, кривая 1). В образцах с добавлением метаксаолина содержание свободной извести на 28-е сутки твердения уменьшилось до 64% (рис. 1, кривая 2), а с добавкой метаксаолина с цементом – до 60% (кривая 4).

Наличие свободной извести в гидравлическом известковом растворе обеспечивает самовосстановление мелких трещин. Это происходит по мере того, как известь в растворе растворяется в воде и, испаряясь, перемещается к поверхности. Реакция между

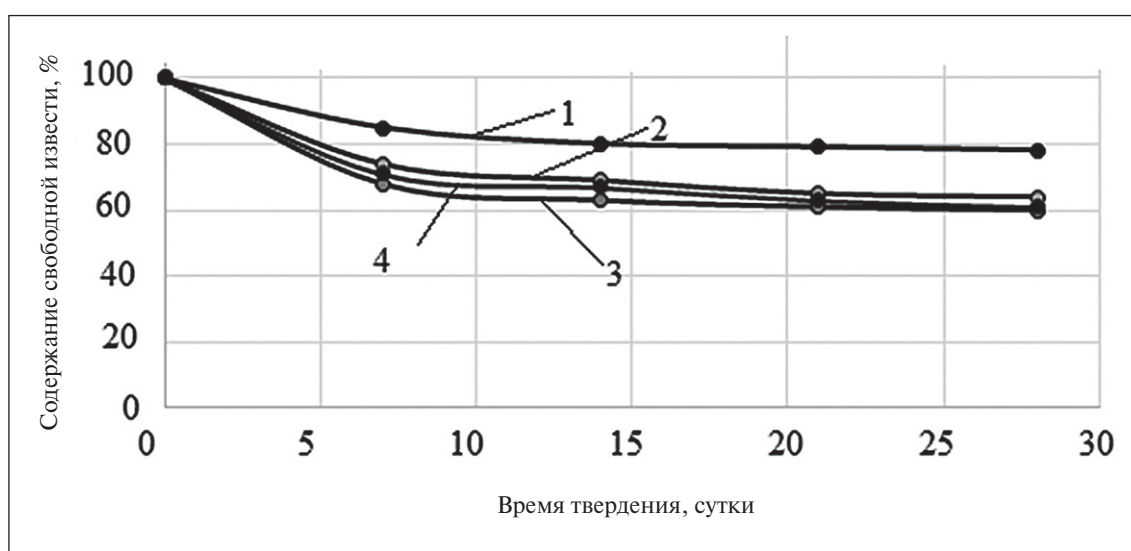


Рис. 1. Кинетика изменения концентрации свободной СаО в известковых композициях: 1 – контрольный известковый состав без добавок; 2 – искусственная гидравлическая известь (добавка метаксаолин 40%); 3 – искусственная гидравлическая известь (добавка метаксаолин 10% + цемент 25%); 4 – искусственная гидравлическая известь (добавка микрокремнезем 10% + цемент 25%)

гидроксидом кальция и атмосферным газообразным диоксидом углерода образует кальцит, который заполняет и закрывает трещины.

При разработке рецептуры штукатурного раствора оценивалось влияние вида кварцевого песка на прочность раствора. Для этого использовали термодинамический метод. При оценке оптимального вида песка в качестве вяжущего применяли искусственную гидравлическую известь, содержащую воздушную гашеную известь и 40% метаксаолина. Образцы твердели в воздушно-сухих условиях. Результаты исследований приведены в табл.4.

Установлено, что с увеличением значений СЭП кварцевых песков наблюдается повышение прочности при сжатии известкового композита. Так, прочность при сжатии известкового композита на основе сурского песка, характеризующегося более высоким значением свободной энергии поверхности (СЭП), равной 70,285 мН/м, составляет 2,4 МПа,

а на основе песка Чаадаевского месторождения, свободная энергия поверхности (СЭП) которого равна 62,8 мН/м, – 1,92 МПа (табл.4). Оптимальным с энергетической точки зрения является песок Сурского месторождения, обеспечивающий более высокую прочность известкового композита.

Растворы на основе искусственной гидравлической извести обеспечивают достаточную прочность сцепления с кирпичной подложкой, составляющую 0,4–0,55 МПа (рис. 2). Прочность сцепления раствора на основе гидравлической извести составляет $R_{сц} = 0,6$ МПа.

Повышение прочности сцепления объясняется пуццолановой реакцией метаксаолина, которая усиливает образование геля гидросиликата кальция (С–S–Н), улучшая микроструктуру и адгезионные свойства раствора.

Сопоставление свойств раствора на основе искусственной гидравлической извести НЛ со свойствами

Таблица 4. Значения свободной энергии поверхности (СЭП) кварцевых песков

Наименование песка	Полярная составляющая СЭП, σ^p , мДж/м ²	Дисперсионная составляющая СЭП, σ^d , мДж/м ²	СЭП, мДж/м ²	Энергия поверхности, Дж/кг	Прочность при сжатии, МПа
Ртищевский	50,48	18,49	68,97	593,142	2,1
Раменский	53,08	16	69	614,1	2,3
Никольский	50,335	18,49	68,82	557,442	2,0
Сурский	51,79	18,49	70,285	687,106	2,4
Чаадаевский	48,36	14,44	62,8	436,46	1,92

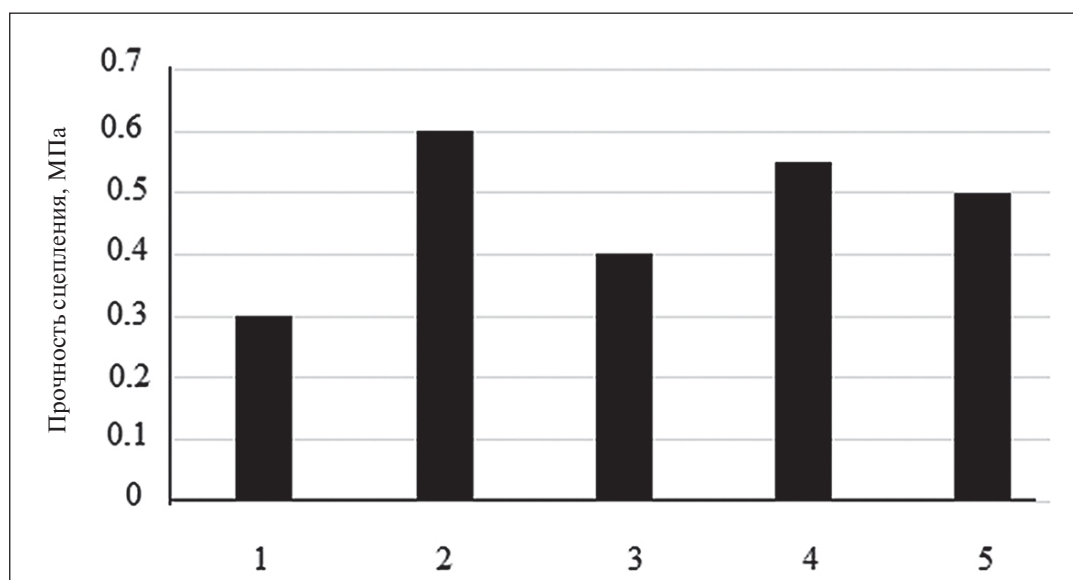


Рис. 2. Прочность сцепления раствора с кирпичной подложкой: 1 – раствор на основе воздушной извести; 2 – раствор на основе гидравлической извести; 3 – раствор на основе воздушной извести + 25% портландцемента; 4 – раствор на основе гашеной извести + 40% метаксаолина; 5 – раствор на основе негашеной извести + 10% метаксаолина

раствора на основе натуральной гидравлической извести NHL показывает, что предлагаемая рецептура искусственной гидравлической извести обеспечивает требования национальных и международных нормативных документов в части достижения минимального значения предела прочности при сжатии, равного 2,0 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусствен-

ной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита. Выявлено, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Разработаны составы искусственной гидравлической извести НЛ и штукатурного раствора на ее основе, предназначенные для реставрации объектов культурного наследия и отделки вновь возводимых объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками. *Региональная архитектура и строительство*. 2010;2:53-57. EDN: **MXHSSL**
2. Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита. *Строительные материалы*. 2011;12:62-65. EDN: **OORTDR**
3. Пухаренко Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова. *Вестник гражданских инженеров*. 2011;1:98-103.
4. Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I., Kilikoglou V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cem. Concr. Res.* 2005;35:1577-1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>
5. Kang S.-H., Lee S.-O., Hong S.-G., Kwon Y.-H. Historical and Scientific Investigations into the Use of Hydraulic Lime in Korea and Preventive Conservation of Historic Masonry Structures. *Sustainability*. 2019;11:5169.
6. Шелихов Н.С., Рахимов Р.З. Гидравлическая известь и романцемент из минерального сырья Татарстана. *Строительный вестник Татарстана*. 2002;2:48-53.
7. Arizzi A., Cultrone G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Constr. Build. Mater.* 2012;31: 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069>
8. Aggelakopoulou E., Bakolas, A., Moropoulou A. Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Appl. Clay Sci.* 2011;53:15-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>
9. Stefanidou M., Tsardaka E.C., Pavlidou E. Influence of nano-silica and nano-alumina in lime-pozzolan and lime-metakaolin binders. *Mater Today Proc.* 2017;4:6908-6922. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.020>
10. Duran A., Navarro-Blasco I., Fernandez J.M. et al. Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica. *Constr Build Mater.* 2014; 58:147-158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.030>
11. Nunes C., Slizkova Z. Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture. *Constr Build Mater.* 2016;114:896-905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.029>
12. Ramenzianpour A.A., Kazemian N., Sedighi S. et al. Study of durability of mortars with natural pozzolans under carbonation. *J. New Approach Civil Eng.* 2019;3(3):63-75.
13. Ergenc D., Fort R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO₂ environments. *Constr Build Mater.* 2018; 188:314-325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.125>
14. Navratilova E., Rovnanikova P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Constr Build Mater.* 2016;120:530-539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
15. Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры. *Сухие строительные смеси*. 2011;4:16-19. EDN: **UBYJMN**
16. Лукутцова Н. П., Карпиков Е. Г., Пыкин А. А., Панов Д. М. Исследование пуццолановой активности добавки высокодисперсного волластонита методом Фраттини. *Вестник Белгородского государственного тех-*

нологического университета им. В.Г. Шухова. 2024;9(12):8-17. <http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/4840>.
<https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-12-8-17> EDN: BZOUFW

17. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама. *Техника и технология силикатов*. 2021;28(1):7-12. EDN: JIHBPI

18. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Вешнякова Л.А., Тутыгин А.С. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород. *Нанотехнологии в строительстве*. 2013;3:56-65. http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_3_2013.pdf EDN: QBMULT

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

Логанина Валентина Ивановна – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Управление качеством», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация, loganin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7532-0074>

Гарькина Ирина Александровна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация, i.a.naum@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3371-3579>

Ткач Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры Градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, tkachev@mgsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>

Степина Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, kafSM@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

ВКЛАД АВТОРОВ

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

Гарькина И.А. – изготовление образцов.

Ткач Е.В. – администрирование проекта, проверка результатов исследования и выводов.

Степина И.В. – обзор литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 05.04.2026; принята к публикации 10.04.2026.

Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration

Sergey D. Epikhin* , Aleksandr S. Inozemtsev 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: epikhinsd@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. Obtaining self-compacting structural lightweight concretes (LWSCC) is an urgent scientific and practical task in the development of multifunctional building materials, where the main problem is to maintain uniformity with high fluidity. Russian studies and studies from other countries have been devoted to this problem. The main focus was on prescription factors that affect the rheological and technological properties of LWSCC. The content of components with different densities is the main difficulty of this development. Oscillation is one of the methods for estimating changes in the rheology of cement-mineral systems over time. Early studies of LWSCC on hollow microspheres showed changes in rheological properties with changes in the concentration of plasticizer, W/C ratio and the dispersion of the mineral aggregate. The next stage of research on the rheology and uniformity of LWSCC by the oscillation method is to establish the influence of each component in a separate group of cement–mineral systems included in LWSCC. **Methods and Materials.** The object of research is cement-mineral systems from different combinations of components in a constant ratio of their mass parts, which make up LWSCC on hollow microspheres with an average density of 1400 kg/m³. The subject of the study is the rheological properties of such systems during oscillation. Plasticized and non-plasticized systems were compared. The following parameters were used to analyze the structure of the studied systems: the thickness of the water shell, the volume of cement dough, the thickness of the cement dough, and the grain spreading coefficient. **Results and Discussion.** The kinetics of the shear stress variation during oscillation is described by varying intensity, showing the transformation of the cement system structure over time. There is a noticeable difference between the changes in the rheological properties of cement pastes with and without plasticizer. The importance of the addition of micro-silica in the stabilization of the concrete mixture is emphasized. **Conclusion.** The water thickness (h_w) is a structural parameter that does not take into account the surface properties of dispersed phases and liquids in plasticized systems. The determination of the water consumption of LWSCC components and the role of plasticizer in this is a promising direction for the development of the topic.

KEYWORDS: cement-mineral paste, self-compacting concrete, lightweight concrete, concrete on hollow microspheres, rheological properties, shear stress, oscillation, plasticizer, uniformity, delamination, liquefaction

ACKNOWLEDGEMENTS: This work is being carried out as part of the Program for the Development of the federal State Budgetary Educational institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" for 2025–2036. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project № FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации

Сергей Дмитриевич Епихин* , Александр Сергеевич Иноземцев 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальной научно-практической задачей в разработке многофункциональных строительных материалов является получение самоуплотняющихся конструкционных легких бетонов (ЛСУБ), где основная проблема – сохранение однородности при высокой текучести. Данной проблеме посвящены отечественные и зарубежные исследования. Основным акцент ставился на рецептурные факторы, влияющие на реологические и технологические свойства ЛСУБ. Сложность разработки объясняется содержанием компонентов разных плотностей. Осцилляция смеси – один из методов оценки изменения реологии цементно-минеральных систем во времени. Ранние исследования ЛСУБ на полах микросферах данным способом оценивали изменения реологических свойств при изменении концентрации пластификатора, В/Ц и дисперсности минерального заполнителя. Следующий этап исследований реологии и однородности ЛСУБ методом осцилляции – установление влияния каждого компонента в отдельно взятой группе цементно-минеральных систем, входящих в ЛСУБ. **Методы и принципы исследования.** Объект исследования – цементно-минеральные системы из разных комбинаций компонентов с постоянным соотношением их массовых частей, составляющих ЛСУБ на полах микросферах средней плотностью 1400 кг/м³. Предмет исследования – реологические свойства таких систем при осцилляции. Сравнивались пластифицированные и непластифицированные системы. Для анализа структуры исследуемых систем использовались следующие параметры: толщина водной оболочки, объем цементного теста, толщина цементного теста, коэффициент раздвижки зерен. **Результаты исследования.** Однородность цементно-минеральных паст оценена по реологической кривой, полученной осцилляционным воздействием. Кинетика изменения напряжения сдвига при осцилляции описывается различной интенсивностью, показывая преобразование структуры цементной системы во времени. Наблюдается заметное различие между изменениями реологических свойств цементных паст с пластификатором и без него. Подчеркивается значимость микрокремнезема в стабилизации бетонной смеси. **Заключение и обсуждение.** Структурный параметр – толщина водной прослойки (h_g) – не учитывает поверхностные свойства дисперсных фаз и жидкости в пластифицированных системах. Определение водопотребности компонентов ЛСУБ и роль пластификатора в этом является перспективным направлением развития темы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементно-минеральная паста, самоуплотняющийся бетон, легкий бетон, бетон на полах микросферах, реологические свойства, напряжение сдвига, осцилляция, пластификатор, однородность, расслоение, разжижение

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная работа выполняется в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 годы. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

INTRODUCTION

The development of multifunctional building materials is one of the recognized global trends in construction [1–4]. Such materials include high-strength lightweight concretes, which are developed by domestic and foreign engineers [5–7]. A popular scientific and practical task in the technology of structural and high-strength lightweight concretes is to expand the scope of application [8, 9], for example, for use in monolithic construction. Increasing the workability of high-strength lightweight concretes and

achieving their self-compaction [10] while maintaining uniformity is of interest in the study of such systems.

The main problem of self-compacting concretes (SCC) is the preservation of uniformity with high mobility of the mixture [11]. The main attention in the research of self-compacting concrete mixtures has been focused on prescription factors that affect the rheological and technological properties of the substrate [12–14]. The key to regulating the mobility and uniformity of concrete mixtures are changes in the amount of water and the quantity and quality of plasticizer [15, 16]. Also, the solid components

of concrete mixtures are of great importance for regulating fluidity and uniformity. The work [17] presents studies of the impact of the use of waste from copper smelting and nanosilica in cast concretes. The results showed that the introduction of nanosilica in a fraction of up to 0.5% of the cement weight contributes to a gradual increase in the strength of fine-grained concrete to 6.7%, but at the same time reduces the plasticity of the mixture, which is observed even with an additive fraction of up to 0.2% of the cement weight. The authors suggested that the solution to this problem could be to increase the proportion of polycarboxylate plasticizer without increasing the W/C ratio.

The development of self-compacting lightweight concretes has great difficulties [18, 19]. The content of components of different densities (more than 1000 kg/m³ and less than 1000 kg/m³) the uniformity of the structure leads to the risk of stratification. Therefore, it is especially important for such systems to correctly select the composition of solid components [20]. One of the methods for assessing changes in the rheology of cement-mineral systems over time is the method of mixture oscillation. Scientists from the University of Glasgow School of Engineering together with scientists from the University of Manchester in their article [21] consider the latest advances in methods for measuring and characterizing dynamic and static rheology, compaction or liquefaction during shear, viscoelasticity and thixotropic structural build-up using rheometers as measuring instruments.

In early studies of lightweight concrete mixtures on hollow microspheres using the oscillation method [22], the authors evaluated changes in the rheological properties of LWSCC when changing parameters: plasticizer concentration, W/C ratio. It was found that the kinetics of viscosity changes during oscillation is described by different intensities, which indicates a transformation of the structure of the concrete mixture. The intensity of thixotropic liquefaction depends more on the concentration of the plasticizer than on the W/C ratio. The achievement of high stability and low fluidity of self-compacting lightweight concrete mixtures on hollow microspheres are in opposite ranges of W/C ratio variation and plasticizer concentration, which requires the search for a compro-

mise formulation solution based on achieving optimal structure.

The next stage in the development of research on the effect of prescription factors on rheological characteristics and uniformity is to determine the effect of each component in a particular group of cement-mineral systems, which are an integral part of self-compacting lightweight concrete mixtures.

METHODS AND MATERIALS

Cement-mineral systems were considered as an object of research. These systems consist of components that are part of high-strength lightweight concretes based on hollow microspheres: Portland cement CEM I 42.5 (C), ceramic microspheres ForeSphere (MS), microsilica MK-85 (SA), fractional sand fr. 0.16–0.63 mm (S_p), quartz flour (S_q) and water (W).

Cement-mineral systems consisted of different combinations of components with a constant ratio of their mass parts, relative to Portland cement, which was:

$$C : SA : S_p : S_q : MS : W = \\ = 1,00 : 0,11 : 0,09 : 0,28 : 0,40 : 0,50.$$

The second series was distinguished by the presence of Melflux 2651F (PI) hyperplasticizer in an amount of 1.4% by weight of Portland cement.

The rheological properties of cement-mineral pastes were studied using an MCR 101 rotary viscometer (Fig. 1) by measuring the shear stress during oscillation of a sensor (measuring system “ball” with a diameter of 8 mm) with a frequency of 15 Hz and a deflection angle of 0.42° for 600 s. The analysis of the obtained dependences was performed in accordance with the methodology described in [22], where the viscosity of the mixture was considered as a rheological parameter. According to this technique, the rheological curve is divided into 3 sections (Fig. 2), each of which is described by a trend line. The coefficients of the equation describing the sections characterize the behavior of the system under study under the influence of oscillation.

Table 1. Properties of the components of the studied pastes and concrete mixtures

№	Component	True density, ρ , kg/m ³	Specific surface area, S_s , m ² /kg	Particle diameter, d_p , mkm
1	Portland cement	3100	121.6	15.9
2	Micro-silica «Frem silica MK-85	2250	171.2	15.6
3	Quartz flour	2650	17.3	130.7
4	Fractional sand	2650	3.3	694.6
5	Ceramic microspheres	580	169.7	61.0



Fig. 1. MCR 101 rotational viscometer with a ball measuring system

Various structural parameters were used to analyze the structure of the studied dispersed systems. The thickness

of the water shell h_w is calculated using the well-known formula:

$$h_w = \frac{V_w}{S_f} = \frac{V_w}{S_{s,f} \cdot m_f}, \quad (1)$$

where V_w is the volume of water, S_f is the total specific surface area of the particles, $S_{s,f}$ is the specific surface area of the particle

The specific surface area can be expressed by a simplified formula (2), taking into account the average particle diameter or taking into account the contribution of particles of various sizes (3)

$$S_s = \frac{6}{d_f \rho_f}, \quad (2)$$

where d_f and ρ_f are the diameter and density of particles of dry components, respectively, v is the proportion of i -s particles of a certain diameter.

The structure parameters for the studied mixtures were calculated

$$\frac{h_{CD}}{d_f} = \frac{v_{CD}/S_f}{d_f}, \quad (3)$$

where v_{CD} и h_{CD} – are the volume and thickness of the cement paste layer, respectively.

RESULTS AND DISCUSSION

Establishing the role of each component of the concrete mixture to solve the problem of a parity combination

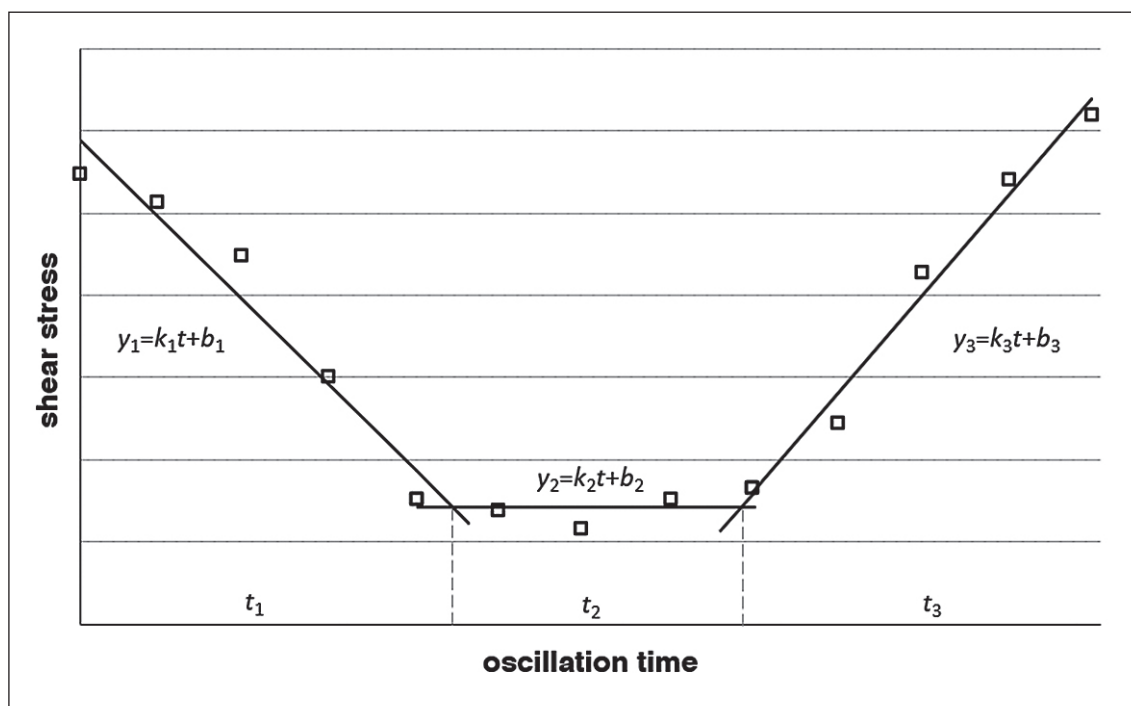


Fig. 2. General view of the rheological curve obtained during oscillation

of high fluidity and the ability to maintain uniformity is of great importance for the development of self-compacting high-strength lightweight concretes. Earlier in [22], an approach was proposed that makes it possible to establish a change in the rheological properties of concrete mixtures under the influence of constant oscillatory action. The changing nature of the flow curve indicates changes in the

structure of the system under study. The analysis is performed by dividing the kinetic dependence into sections that are described by different trend lines. The coefficients of these lines show the intensity of transformation of the structure of the studied dispersed systems.

Fig. 3 shows the dependence of shear stress on time under constant vibration action for cement and cement-

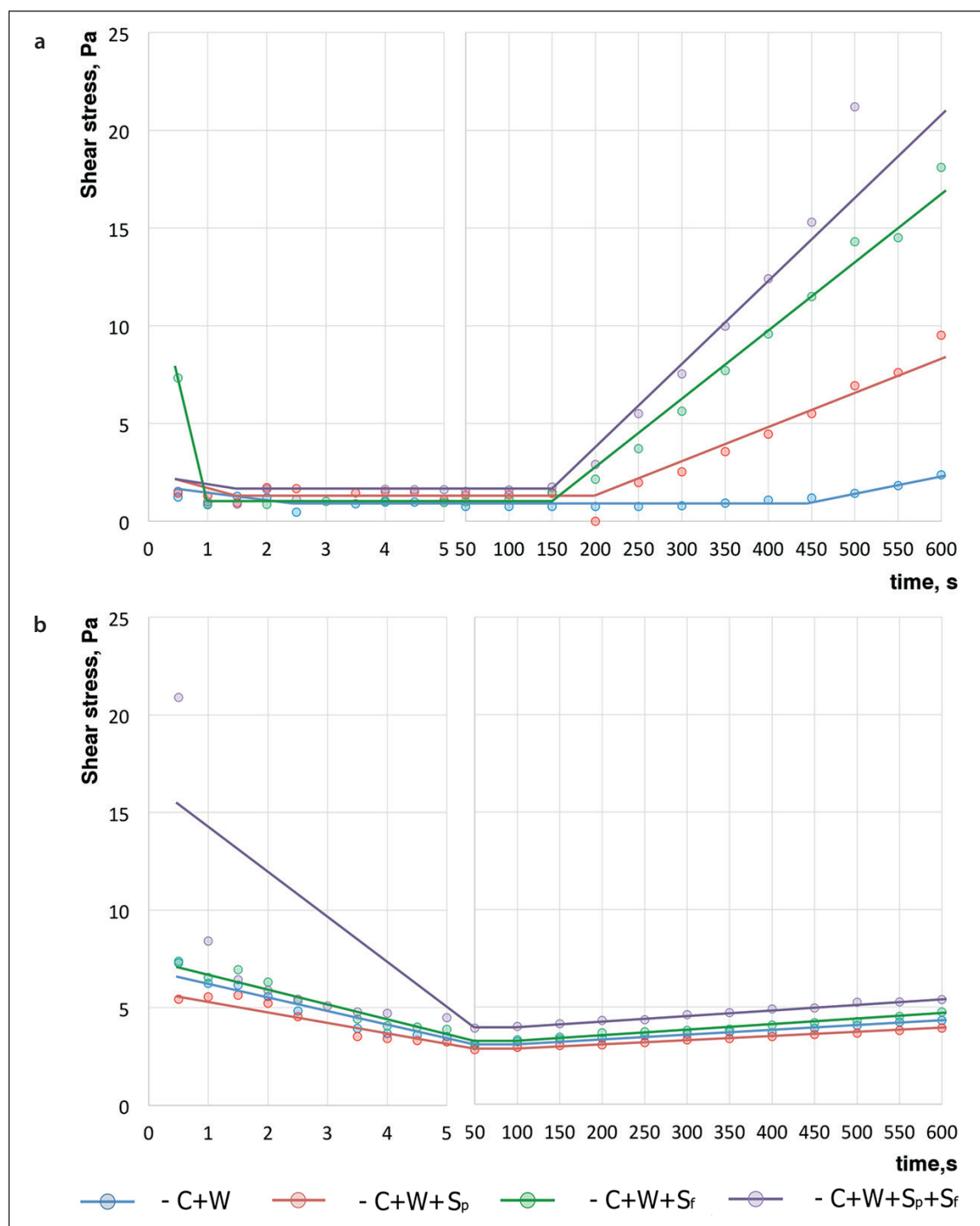


Fig. 3. Change in shear stress of cement-mineral pastes with plasticizer (a) and without plasticizer (b) during oscillation

mineral pastes of various compositions with and without plasticizer.

In accordance with the methodology [22], three sections are highlighted on the presented graphs (Fig. 3), which describe straight lines. The coefficients of these lines are presented in Table 2. A clear difference between the kinetic dependences of shear stress for dispersed systems with and without plasticizer is shown in Fig. 3. Thus, pastes with plasticizer have a short (1.5...3.5 s) descending section 1, which is associated with thixotropic liquefaction. After that, the vibration effect does not lead to a change in the shear stress. This is section 2, which lasts for 150 to 450 seconds. After this section, the intensive increment of the shear stress to values exceeding the initial yield strength is fixed. This behavior may be caused by the transition of a dispersed system from a stable coagulation structure to an inhomogeneous one. Constant vibration exposure leads to a violation of uniformity, for example, the separation of the paste due to the convergence and formation of aggregates of dense particles, which tend to sedimentation under the influence of gravity. The addition of ground or fractionated sand to the cement paste reduces site 2.

Another dependence of the shear stress on the oscillation time is typical for the studied pastes without plasticizer. The shear stress has a significantly higher initial value, which is expressed by a longer section 1. The beginning of the ascending section 3 can be identified earlier than for the same pastes, but with a plasticizer. Section 2 is poorly identified, which is clearly observed when the parameters of the trend lines are analyzed. The results are presented in Table 2.

Table 2 shows, that within the experiment the duration of section 3 for pastes without plasticizer is 550 s, at which the shear stress increment occurs when close shear stress values are reached, as indicated by $b_2 = 2.81...4.19$. In this case, the intensity of the increment, which is described by the coefficient k_3 , also has close values of 0.002...0.003. This behavior of the studied systems without plasticizer

can be explained by the uneven distribution of water for wetting particles and the absence of a dispersing effect. A comparative analysis of the coefficients for each site shows the role of the plasticizer both in the dilution (b_1 is 1.38...13.8 versus 6.39...26.4) and in the rate of uniformity disturbance (k_3 is an order of magnitude higher) of the pastes.

An analysis of lines 1–4 in Table 2 shows that the rheology of plasticized pastes can be controlled using either dispersed components or combinations of them. It is shown that the introduction of quartz flour into the paste leads to a slight thickening, but reduces the duration of phase 2 from 450 to 250 seconds: it leads to an early violation of uniformity. The use of larger quartz particles in the paste leads to a greater intensification of the described effect. The high density of such pastes (b_1 is 10 times greater) is explained by the high friction of quartz sand particles, and their size (fr. 0.16-0.63 mm), which exceeds the size of both flour and Portland cement, promotes faster stratification (k_3 increases from 0.01 to 0.04). This effect can be balanced by a combination of S_f and S_p . In this case, the plasticized paste, which consists of Portland cement, water and quartz flour, forms a layer between the particles of fractionated sand, reducing their friction. However, an increase in the proportion of quartz components leads to an acceleration of delamination (k_3 increases to 0.06), due to a decrease in the proportion of binder, which forms the coagulation structure of the system under study.

Thus, it is shown that the variation of the components of the dispersed medium makes it possible to control the rheological behavior of the paste. Reducing the proportion of binder by filling with quartz sand or a fine mineral additive reduces the ability of such systems to maintain uniformity. This is significantly noticeable on plasticized cement pastes.: the larger the particles of the dispersed phase, the more intense the stratification processes.

It is known that the use of fine mineral additives makes it possible to increase the uniformity of dispersed systems

Table 2. Parameters of the dependence of the shear stress of cement-mineral pastes on the oscillation time

№	The presence of plasticizer	Marking the composition	Sector 1			Sector 2		Sector 3			
			k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c	
1	PI	C+W	–	–0.25	1.38	3.5	0.87	447	0.01	–2.47	150
2			+ S_p	–0.51	1.74	1.5	1.48	248	0.02	–3.77	350
3			+ S_f	–13.0	13.8	1.0	0.94	149	0.04	–5.16	450
4			+ S_p + S_f	–0.67	1.81	1.5	1.52	248	0.06	–10.4	300
5	–	–	–	–0.85	7.29	5.0	3.39	45	0.002	2.97	550
6			+ S_p	–0.63	6.39	5.0	2.81	45	0.002	2.70	550
7			+ S_f	–0.84	7.73	5.0	3.01	45	0.003	3.04	550
8			+ S_p + S_f	–14.5	26.4	1.5	4.19	45	0.003	3.73	550

due to their high water retention capacity. The effect of micro-silica on the graph of the shear stress curve of cement-mineral pastes during oscillation is shown in Fig. 4.

Fig. 4 shows that plasticized cement-mineral pastes with micro-silica have a low initial shear stress (less than 12 Pa), which are close to the values for pastes without

plasticizer shown in Fig. 3 (less than 10 Pa), in contrast to non-plasticized pastes, where the values have changed by an order of magnitude (152...378 Pa versus 5.4...20.9 Pa). In Fig. 3b, the pastes C+B+SA+S_p and C+W+SA+S_p+S_r can be distinguished. Despite the possibility to identify individual sites, these cement-mineral systems are char-

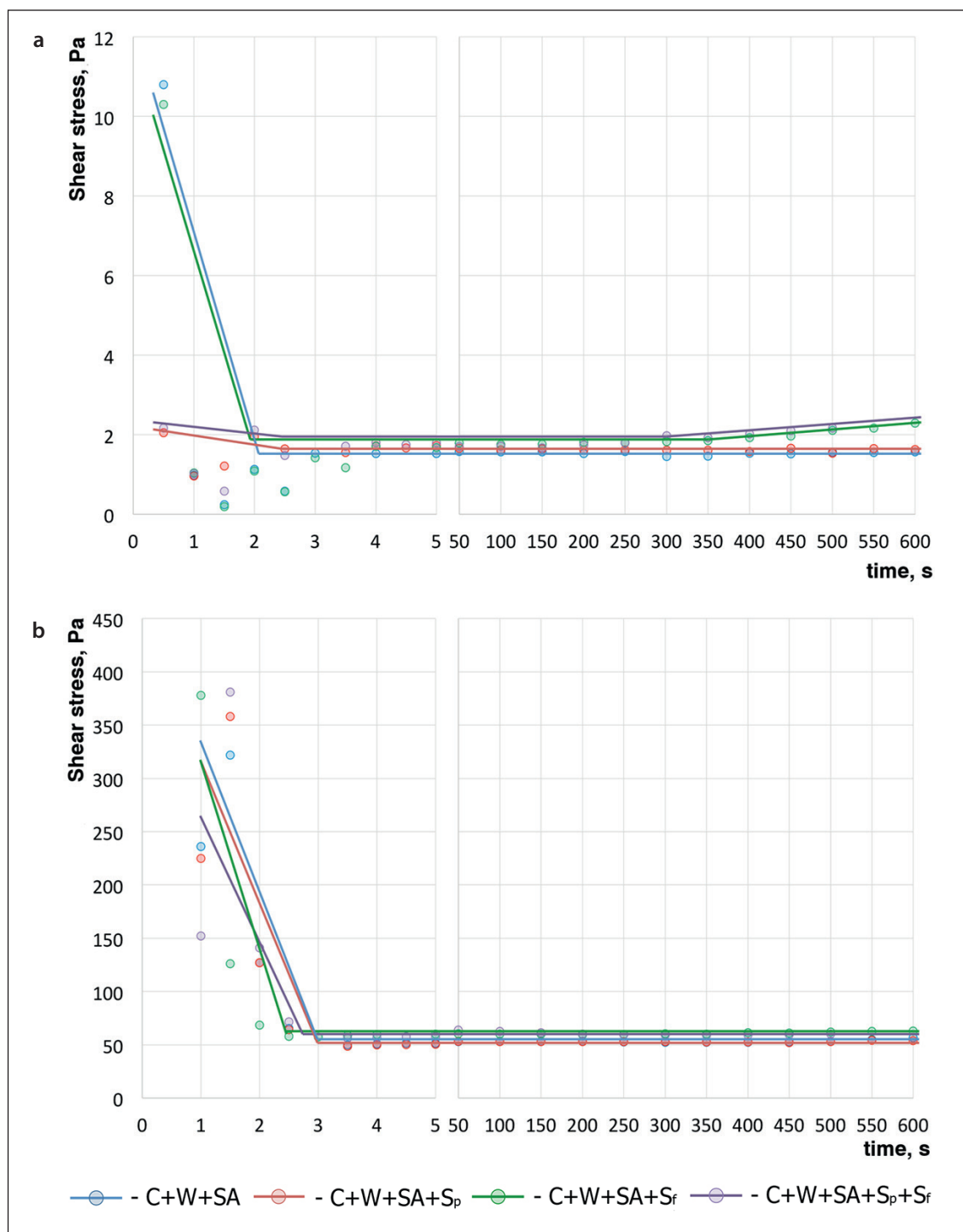


Fig. 4. Change in shear stress of cement-mineral pastes with plasticizer (a) and without plasticizer (b) during oscillation

acterized by a relatively low variability of shear stress throughout the entire period of oscillatory action: within 1.5...2.3 Pa. At the same time, the absence of ground sand (blue and green graph in Fig. 4a) in the composition increases the value of the initial shear stress. It is also noted that the systems with micro-silica and with fractionated sand (green and purple graph in Fig. 4a) differ in the presence of an ascending section on the rheological curve. This means that quartz sand acquires the role of a component that intensifies the violation of the uniformity of the paste structure. However, the intensity of this process is not significant for the studied systems.

The absence of plasticizer in the investigated micro-silica pastes changes the features of their rheological behavior (Fig. 4b). Thus, all types of pastes are distinguished by the absence of site 3 within the duration of the study. At the same time, dilution as a result of the oscillatory effect proceeds in similar time ranges (Table 3).

It is noted that the thickening of pastes due to the introduction of micro-silica affects the intensity of liquefaction, which occurs faster (after 2.5 seconds versus 5 seconds). However, such a mixture has a higher b_2 coefficient, which increased by an order of magnitude from 2.81...4.19 to 50.9...59.0.

Thus, it can be concluded about the role of the components in the studied pastes to control their properties. In plasticized cement-mineral pastes, varying the content of quartz flour makes it possible to reduce the flow rate while maintaining uniformity. Varying the content of a large fraction of quartz sand can be used to control the thixotropic dilution of cement mixtures, but the increased tendency to delamination must be taken into account. Micro-silica makes it possible to stabilize the structure of cement-mineral pastes, including plasticizer systems.

Obviously, in the studied dispersed systems based on Portland cement or quartz sand, the change in structure under the influence of vibration will be slower. This is due to the fact that the density of the dispersed phase, which is a fractionated quartz aggregate and a dispersion medium

(cement-mineral paste) have similar values. The introduction of a hollow filler, such as hollow microspheres, will lead to a decrease in the stability of the system, the tendency to stratification of which will occur earlier. However, it is impossible to ensure the high fluidity that self-compacting concrete mixtures on a hollow filler should have without using a plasticizer.

Fig. 5 shows that the introduction of hollow microspheres into plasticized and non-plasticized cement-mineral systems with micro-silica contributes to the appearance of site 3. The only system without this site is $C+W+SA+MS+S_p+S_f$. It is noted that the stability period is longer for plasticizer systems, where the exception is $C+W+SA+MS+S_f$ because in this system the period of preservation of uniformity is the same with the same composition of the mixture without plasticizer. This once again proves the previous thesis about the role of sand as a component that intensifies the violation of the uniformity of the paste. In systems without plasticizer, the introduction of quartz filler of different dispersion and volume (S_p and S_f) contributes to a change in the onset of stratification over time: it leads to a later stratification. In plasticized mixtures, a change in the dispersion of the filler does not change the mark of the beginning of stratification: section 3 for compositions $C+W+SA+MS$, $C+W+SA+MS+S_f$, $C+W+SA+MS+S_p$, starts at $t = 350$. The combined introduction of fillers of different dispersion (S_p+S_f) will lead to a later start of the stratification process. So, for $C+W+SA+MS+S_p+S_f$ the set oscillation time ($t = 600$ seconds) is not sufficient to accurately determine the beginning of the stratification period of the mixture.

The introduction of hollow microspheres significantly changes the rheology of the investigated cement pastes with silica: both with and without plasticizer. Almost all studied systems with microspheres have a section 3 (Fig. 5b) within the duration of the study. Dilution due to oscillation occurs in similar time ranges for plasticized systems, except for the composition with S_p+S_f , and dif-

Table 3. Parameters of the dependence of the shear stress of cement-mineral pastes on the oscillation time

№	The presence of plasticizer	Marking the composition	Sector 1			Sector 2		Sector 3			
			k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c	
1	PI	C+W+SA	-	-19.6	20.6	2.0	1.54	598	-		
2			+ S_p	-2.17	3.14	2.0	1.65	598	-		
3			+ S_f	-18.5	19.6	2.0	1.71	346	0.002	1.12	200
4			+ $S_p + S_f$	-2.30	3.32	2.0	1.74	297	0.001	1.56	300
5	-	C+W+SA	-	-141.4	435	2.5	51.3	597	-		
6			+ S_p	-142.7	443	2.5	50.9	597	-		
7			+ S_f	-203.6	514	2.5	59.0	597	-		
8			+ $S_p + S_f$	-96.4	354	2.5	59.0	597	-		

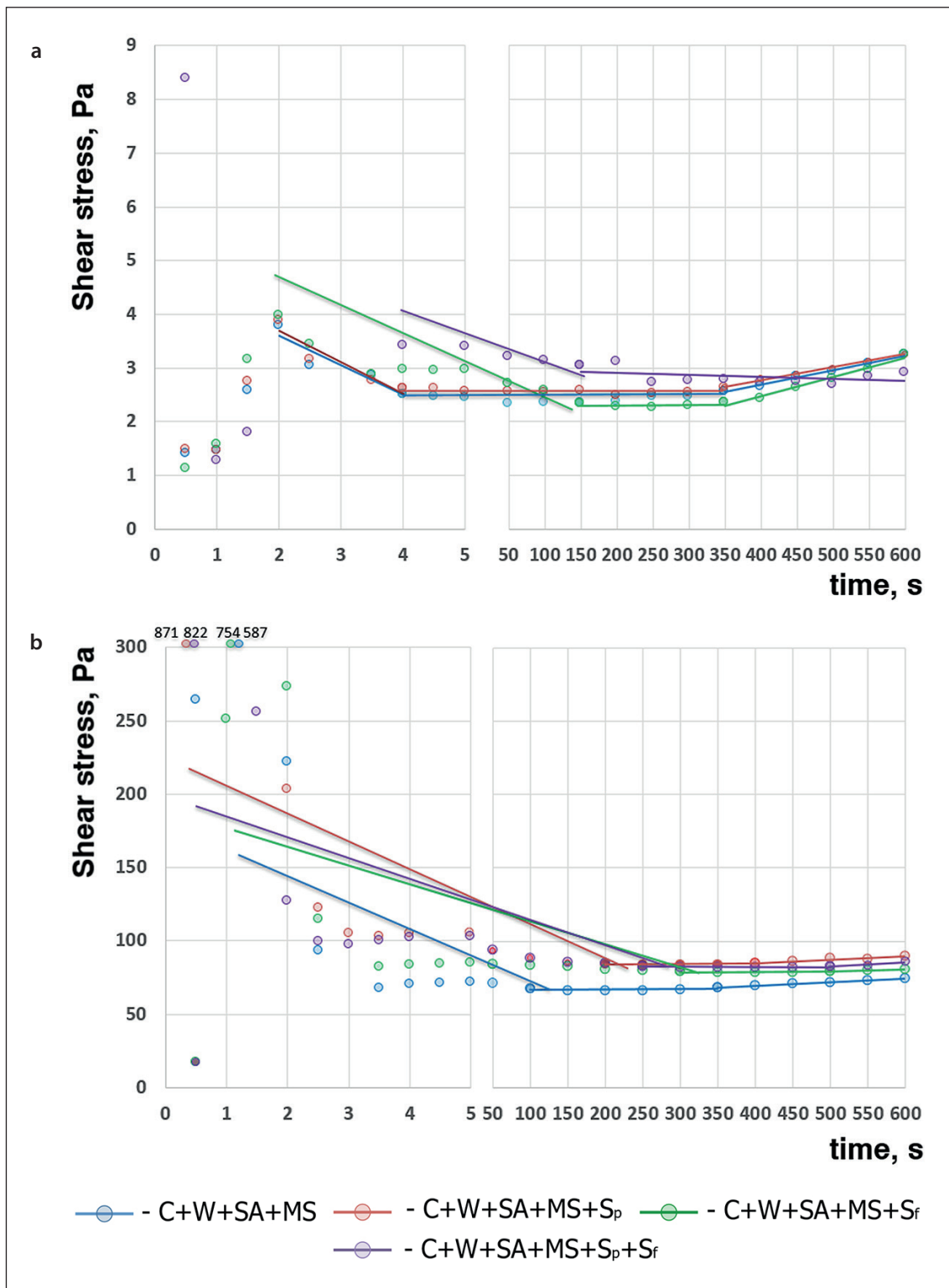


Fig. 5. Change in shear stress of cement-mineral pastes with plasticizer (a) and without plasticizer (b) during oscillation

ferent ranges for systems without plasticizer, where a decrease in site 3 occurs due to an increase in the size of the quartz aggregate (Table 4).

A feature of the rheological behavior of mixtures on hollow microspheres is the presence of a short interval in the initial period of time, when an increase in shear stress

Table 4. Parameters of the dependence of the shear stress of cement-mineral pastes on the oscillation time

№	The presence of plasticizer	Marking the composition		Sector 1			Sector 2		Sector 3		
				k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c
1	PI	C+W+ SA+MS	–	–0.55	4.69	2.0	2.41	346	0.003	1.59	250
2			+ S_p	–0.58	4.85	2.0	2.58	346	0.002	1.79	250
3			+ S_f	–0.01	3.21	148	2.28	200	0.004	1.04	250
4			+ S_p + S_f	–0.003	3.4	146	3.0	454	–	–	–
5	–	C+W+ SA+MS	–	–1.33	172.4	98.5	66.6	251.5	0.02	59.8	250
6			+ S_p	–1.12	251.4	199	83.0	201	0.02	75.3	200
7			+ S_f	–0.53	195.4	299	78.8	201	0.01	74.0	100
8			+ S_p + S_f	–0.65	203.8	249	82.6	251	0.03	66.0	100

is recorded under the oscillatory action of the rheometer measuring system. The explanation of this type of change and its significance requires additional research.

Thus, it has been established that multicomponent dispersed systems have complex rheological behavior. The introduction of a light, finely dispersed phase stabilizes the system and prevents stratification for a certain period of time.

It is obvious that the rheological behavior of dispersed systems is associated with the formation of a certain structure. The properties of such a structure depend on the parameters that are achieved by varying prescription factors. Such structural parameters for cement-mineral pastes and concrete mixtures include the volume of cement paste, the

thickness of the water layer, the particle size of the dispersed phase, the grain spreading coefficient or the distance between the particles of the dispersed phase, etc. [5]. Table 5 shows some structural parameters of the studied mixtures.

Varying the formulation of cement-mineral paste or concrete mixture leads to the formation of a structure that can be described by various parameters. This is clearly demonstrated in Table 5. The determination of the dependence of the rheological properties of a dispersed system on its structural parameters will make it possible to determine the prescription factors that allow them to be controlled. Table 6 shows the results of the correlation analysis of rheological parameters for some of the studied dispersed systems.

Table 5. Structural parameters of cement-mineral pastes

№	Dispersed		$\Sigma S, \cdot 10^3 \text{ m}^2$	$h_w, \text{ mkm}$	v_{CD}	$S_r, \cdot 10^3 \text{ m}^2$	h_{CD}	h_{CD}/d_f
	Environment	Phases						
1	C+W	S_p	72.5	8.03	0.96	0.9	1010	7.72
2		S_f	72.1	7.46	0.89	0.5	1653	2.38
3		SA	83.1	6.88	0.94	11.5	81.8	5.25
4		MS	111.2	2.98	0.55	39.7	13.7	0.23
5		S_p + S_f	73.0	7.10	0.85	1.48	575	1.39
6		S_p + SA	84.0	6.54	0.91	12.5	72.6	0.99
7		S_p + MS	112.2	2.88	0.53	40.6	13.1	0.14
8		SA + S_f	83.6	6.10	0.84	12.0	69.7	0.20
9		SA + MS	122.7	2.61	0.53	51.2	10.3	0.27

Table 6. Correlation coefficient between structural and rheological parameters

Parameters	With plasticizer				Without plasticizer			
	h_w	v_{CD}	h_{CD}	h_{CD}/d_f	H_w	v_{CD}	h_{CD}	h_{CD}/d_f
k_1	–0.35	–0.40	–0.11	–0.17	–0.33	–0.50	0.42	0.09
b_1	0.17	0.23	0.03	0.09	0.18	0.37	–0.54	–0.15
b_2	–0.91	–0.88	–0.72	–0.56	–0.28	–0.09	–0.68	–0.35

It has been established that the rheological parameters (k_1 , b_1 , b_2) of systems with and without plasticizer have a good correlation with some structural parameters. Table 6 shows that in non-plasticized systems, the volume of cement paste (v_{CD}) is a sensitive structural parameter to the intensity of liquefaction in the initial time period (k_1), and the thickness of cement paste (h_{CD}) to the initial shear stress (b_1). This may be due to the noticeable transformations that the system undergoes at the initial stage of the oscillation effect. That is, without a plasticizer, the mixtures are thick and dilute more intensively under the influence of vibration. The greatest correlation coefficients ($|r|$) with rheological parameters with both b_1 and b_2 are observed in the thickness of the h_{CD} cement paste layer. For dispersed plasticizer systems, a high correlation coefficient (modulo) is characteristic of each structural parameter and rheological parameter b_2 . The most sensitive ($|r| > 0.80$) structural parameter to the magnitude of the shear stress b_2 , which the mixture tends to under the influence of vibration, is the thickness of the water layer h_w and the volume of the cement paste v_{CD} .

Thus, it is shown that the common structural parameters used to describe dispersed systems have limited applicability. For thick mixtures, the selected structural parameter can be used to estimate the intensity of liquefaction, and for fluid mixtures, to estimate the maximum amount of liquefaction. However, it is worth noting that none of these structural parameters, calculated using known prescription formulas, takes into account the con-

tribution of the plasticizer. That is, both the distribution of water (h_w) and the volume of cement paste (v_{CD}), which depends on it, for a system with and without plasticizer are identical to the structural parameters. Therefore, plasticized dispersed systems such as self-compacting concrete mixtures require parameters that take into account the role of the plasticizer.

CONCLUSION

The research results have shown that plasticized multicomponent dispersed systems have complex rheological behavior, which indicates the peculiarities of the formation of the structure of the concrete mixture with plasticizer. It is shown that filling cement systems with larger components reduces the ability of such systems to maintain uniformity. A large proportion of fine components, such as quartz flour or silica, increase the uniformity of both plasticized and non-plasticized cement-mineral systems. It is shown that hollow microspheres significantly change the rheology of cement systems, which is characterized by an increased tendency to delamination. Correlation analysis has shown the incorrectness of using traditional structural parameters of dispersed systems to describe their properties, especially with plasticizer. Standard applied structure parameters such as the thickness of the water layer or the thickness of the cement paste layer ignore the properties of the dispersed phases and the liquid in the system. This creates the need to search for such criteria.

REFERENCES

1. Batyanovskiy E.I., Bondarovich A.I., Kalinovskaya N.N., Ryabchikov P.V. Self-Compacting Concrete and Concreting Technology for Foundation Block Using 9000 Cubic Meters of Concrete. *Science & Technique*. 2021;20(4):329-337. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337>
2. Larsen O.A., Bakhrah A.M., Mashina T.Y. Organomineral modifier based on slurry water for obtaining high-strength self-compacting concretes. *Silicate engineering and technology*. 2024;31;4: 365-376. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-365-376> – EDN: MJUPXW.
3. Tarakanov O.V., Yerofoeva I.V., Belyakova E.A., Moskvina R.N., Sanyagina Ya.A., Khristoforova I.A. Modeling of early structure formation and hardening of cement materials with organomineral additives. *Nanotechnologies in construction: scientific online journal*. 2024; 16; 6: 510-524. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524> – EDN: QQDQLS.
4. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. New generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures. *Civil Engineering magazine*. 2012;8(34):47-53. (In Russ) <https://doi.org/10.5862/MCE.34.7> – EDN: PJWLHF.
5. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Doung T.K. A structural model of the flow of plasticized cement-mineral mixtures. *Building materials*. 2020;4-5:90-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96> – EDN: CVBCCH.
6. Al-Khaiat H., Haque M.N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 1998.28.6:859-866 [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00051-9) – EDN: ABJIXX

7. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. Strength and deformation characteristics of high-strength self-sealing lightweight concretes on artificial and natural porous fillers. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2025;628(3):52-68. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68) – EDN: SWWFTR
8. Zhang Y.H., Wang H., Zhong W.L., Fan L.F. Development of a high-strength lightweight geopolymer concrete for structural and thermal insulation applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03949. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03949>
9. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Lightweight concretes on hollow and porous aggregates. *Building materials*. 2024;7:41-47. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47> – EDN: UNEDCX
10. Inozemtsev A.S., Epikhin S.D. The effect of dense and hollow aggregates on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Materials*. 2024;17;18:4569. <https://doi.org/10.3390/ma17184569> – EDN: SPPCRB.
11. Dengwu J., Caijun Sh., Qiang Y., Xiaopeng A., Yu L., Huang L. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*. 2017;83:146-159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
12. Lee S. H., Kim H. J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003;33;5:763-768 [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01054-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01054-2)
13. Miguel C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, Sandrine F. Pereira. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;166:373-385/ <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>
14. Biricik Ö., Mardani A. Parameters affecting thixotropic behavior of self-compacting concrete and 3D printable concrete; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2022; 339: 127688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127688>
15. Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological properties of self-compacting lightweight concrete mixtures on hollow microspheres. *Construction: science and education*. 2024;14;1:18-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.9>
16. Gorodetsky I.Yu., Serdyuchenko V.M. Features of using self-compacting concrete. *The scientific heritage*. 2021; 72-2 (72): 3-5. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5> – EDN: GGKADP.
17. Kravtsov A.V., Tsybakin S.V., Evseeva T.M., Sobolev K.G., Potapov V.V. Cast concretes using waste from copper smelting and nanosilicon. *Vestnik MGSU*. 2017;12;9(108):1010-1018. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.9.1010-1018> – EDN: ZHKODZ.
18. Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010;24;1:11–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.004>
19. Wu Z., Zhang Y., Zheng J., Ding Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):2087-2092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.023>
20. Behnam V., Shami N. Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2016; 4: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.10.002>
21. Peng Y., Unluer C. Advances in rheological measurement and characterization of fresh cement pastes. *Powder Technology*. 2023;429:118903. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118903>
22. Epikhin S. D., Inozemtsev A. S. Homogeneity of self-compacting lightweight concrete mixtures on hollow micro-spheres. *Engineering and Technology of Silicates*. 2025;32;4:369-379. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-369-379> – EDN: OQZMLA.

ADDITIONAL INFORMATION

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey D. Epikhin – postgraduate student, teacher, Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, epikhinsd@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0193-1904>

Aleksandr S. Inozemtsev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, InozemtsevAS@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7807-688X>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey D. Epikhin – performing experimental work, preparing the text of the article; formulation of conclusions.

Aleksandr S. Inozemtsev – scientific guidance, setting the goals and objectives of the study, analysis and examination of results, drawing conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; accepted for publication 02.04.2026.

Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации

Сергей Дмитриевич Епихин* , Александр Сергеевич Иноземцев 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальной научно-практической задачей в разработке многофункциональных строительных материалов является получение самоуплотняющихся конструкционных легких бетонов (ЛСУБ), где основная проблема – сохранение однородности при высокой текучести. Данной проблеме посвящены отечественные и зарубежные исследования. Основным акцент ставился на рецептурные факторы, влияющие на реологические и технологические свойства ЛСУБ. Сложность разработки объясняется содержанием компонентов разных плотностей. Осцилляция смеси – один из методов оценки изменения реологии цементно-минеральных систем во времени. Ранние исследования ЛСУБ на полых микросферах данным способом оценивали изменения реологических свойств при изменении концентрации пластификатора, В/Ц и дисперсности минерального заполнителя. Следующий этап исследований реологии и однородности ЛСУБ методом осцилляции – установление влияния каждого компонента в отдельно взятой группе цементно-минеральных систем, входящих в ЛСУБ. **Методы и принципы исследования.** Объект исследования – цементно-минеральные системы из разных комбинаций компонентов с постоянным соотношением их массовых частей, составляющих ЛСУБ на полых микросферах средней плотностью 1400 кг/м³. Предмет исследования – реологические свойства таких систем при осцилляции. Сравнивались пластифицированные и непластифицированные системы. Для анализа структуры исследуемых систем использовались следующие параметры: толщина водной оболочки, объем цементного теста, толщина цементного теста, коэффициент раздвижки зерен. **Результаты исследования.** Однородность цементно-минеральных паст оценена по реологической кривой, полученной осцилляционным воздействием. Кинетика изменения напряжения сдвига при осцилляции описывается различной интенсивностью, показывая преобразование структуры цементной системы во времени. Наблюдается заметное различие между изменениями реологических свойств цементных паст с пластификатором и без него. Подчеркивается значимость микрокремнезема в стабилизации бетонной смеси. **Заключение и обсуждение.** Структурный параметр – толщина водной прослойки (h_g) – не учитывает поверхностные свойства дисперсных фаз и жидкости в пластифицированных системах. Определение водопотребности компонентов ЛСУБ и роль пластификатора в этом является перспективным направлением развития темы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементно-минеральная паста, самоуплотняющийся бетон, легкий бетон, бетон на полых микросферах, реологические свойства, напряжение сдвига, осцилляция, пластификатор, однородность, расслоение, разжижение

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная работа выполняется в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 годы. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration

Sergey D. Epikhin* , Aleksandr S. Inozemtsev 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: epikhinsd@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. Obtaining self-compacting structural lightweight concretes (LWSCC) is an urgent scientific and practical task in the development of multifunctional building materials, where the main problem is to maintain uniformity with high fluidity. Russian studies and studies from other countries have been devoted to this problem. The main focus was on prescription factors that affect the rheological and technological properties of LWSCC. The content of components with different densities is the main difficulty of this development. Oscillation is one of the methods for estimating changes in the rheology of cement-mineral systems over time. Early studies of LWSCC on hollow microspheres showed changes in rheological properties with changes in the concentration of plasticizer, W/C ratio and the dispersion of the mineral aggregate. The next stage of research on the rheology and uniformity of LWSCC by the oscillation method is to establish the influence of each component in a separate group of cement–mineral systems included in LWSCC. **Methods and Materials.** The object of research is cement-mineral systems from different combinations of components in a constant ratio of their mass parts, which make up LWSCC on hollow microspheres with an average density of 1400 kg/m³. The subject of the study is the rheological properties of such systems during oscillation. Plasticized and non-plasticized systems were compared. The following parameters were used to analyze the structure of the studied systems: the thickness of the water shell, the volume of cement dough, the thickness of the cement dough, and the grain spreading coefficient. **Results and Discussion.** The kinetics of the shear stress variation during oscillation is described by varying intensity, showing the transformation of the cement system structure over time. There is a noticeable difference between the changes in the rheological properties of cement pastes with and without plasticizer. The importance of the addition of micro-silica in the stabilization of the concrete mixture is emphasized. **Conclusion.** The water thickness (h_w) is a structural parameter that does not take into account the surface properties of dispersed phases and liquids in plasticized systems. The determination of the water consumption of LWSCC components and the role of plasticizer in this is a promising direction for the development of the topic.

KEYWORDS: cement-mineral paste, self-compacting concrete, lightweight concrete, concrete on hollow microspheres, rheological properties, shear stress, oscillation, plasticizer, uniformity, delamination, liquefaction

ACKNOWLEDGEMENTS: This work is being carried out as part of the Program for the Development of the federal State Budgetary Educational institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" for 2025–2036. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project № FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка полифункциональных строительных материалов является одним из признанных мировых направлений в строительстве [1–4]. К таким материалам можно отнести высокопрочные легкие бетоны, разработкой которых занимаются отечественные и зарубежные школы [5–7]. Актуальной научно-практической задачей в технологии конструкционных и высокопрочных легких бетонов является расширение области применения [8, 9], например, для применения в монолитном строительстве. Повышение удобоукладываемости высокопрочных легких бетонов, особенно достижение

их самоуплотняемости [10], при сохранении однородности представляет собой предмет для исследования таких систем.

Основной проблемой самоуплотняющихся бетонов (далее СУБ) является сохранение однородности при высокой подвижности смеси [11]. Основной акцент в исследованиях самоуплотняющихся бетонных смесей ставится на рецептурные факторы, влияющие на реологические и технологические свойства СУБ [12–14]. Ключевыми для регулирования подвижности и однородности бетонных смесей являются изменения количества воды и количества и качества пластификатора [15, 16]. Также большое значение для регулирования текучести и однородности

имеют твердые компоненты бетонных смесей. Так, в работе [17] приведены исследования по использованию отходов медеплавильного производства и нанокремнезема в литых бетонах. Результаты показали, что введение нанокремнезема в доле до 0,5% от массы цемента способствует постепенному увеличению прочности мелкозернистого бетона до 6,7%, но в то же время уменьшает пластичность смеси, которая наблюдается даже при доле добавки до 0,2% от массы цемента. Авторы предложили, что решением данной проблемы может быть увеличение доли поликарбоксилатного пластификатора без увеличения соотношения В/Ц.

Разработка самоуплотняющихся легких бетонов сталкивается с еще большими сложностями [18, 19]. Из-за содержания компонентов разных плотностей (более 1000 кг/м³ и менее 1000 кг/м³) однородность структуры подвержена риску расслоения. Поэтому для таких систем особенно важно правильно подбирать состав твердых компонентов [20]. Одним из методов оценки изменения реологии цементно-минеральных систем с течением времени является метод осцилляции смеси. Ученые из инженерной школы университета в Глазго совместно с учеными из манчестерского университета в своей статье [21] рассматривают последние достижения в области методов измерения и определения характеристик динамической и статической реологии, уплотнения или разжижения при сдвиге, вязкоупругости и тиксотропного структурного наращивания с помощью реометров в качестве измерительных инструментов.

В ранних исследованиях легких бетонных смесей на полых микросферах методом осцилляции [22] авторы производили оценку изменения реологических свойств ЛСУБ при изменении параметров: концентрации пластификатора и В/Ц. Было установлено, что кинетика изменения вязкости при осцилляции описывается различной интенсивностью, что указывает на преобразование структуры бетонной смеси. Интенсивность тиксотропного разжижения в большей степени зависит от концентрации пластификатора, чем от В/Ц отношения. Достижение высокой стабильности и низкой текучести самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах

находится в противоположенных диапазонах варьирования В/Ц и концентрации пластификатора, что требует поиска компромиссного рецептурного решения, основанного на достижении оптимальной структуры.

Следующий этап развития исследований рецептурных факторов влияния на реологические характеристики и однородность — это определение влияния каждого компонента в отдельно взятой группе цементно-минеральных систем, которые являются составной частью самоуплотняющихся легких бетонных смесей.

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований были рассмотрены цементно-минеральные системы, состоящие из компонентов, входящих в состав высокопрочных легких бетонов на полых микросферах, а именно: портландцемент ЦЕМ I 42,5 (Ц), керамический микросфер ForeSphere (МС), микрокремнезем МК-85 (МКМ), фракционный песок фр. 0,16–0,63 мм (П_ф), кварцевая мука (П_м) и вода (В). Свойства компонентов представлены в таблице 1.

Цементно-минеральные системы представляли собой различные комбинации компонентов при постоянном соотношении их массовых частей относительно портландцемента, которое составило:

$$\text{Ц} : \text{МКМ} : \text{П}_m : \text{П}_f : \text{МС} : \text{В} = \\ 1,00 : 0,11 : 0,09 : 0,28 : 0,40 : 0,50.$$

Вторая серия отличалась наличием гиперпластификатора Melflux 2651F (Пл) в количестве 1,4% от массы портландцемента.

Исследование реологических свойств цементно-минеральных паст осуществлялось с помощью ротационного вискозиметра MCR 101 (рис. 1) путем измерения величины напряжения сдвига при колебательном воздействии (осцилляции) датчика (измерительная система «шар» диаметром 8 мм) с частотой 15 Гц и углом отклонения 0,42° в течение 600 с. Анализ полученных зависимостей выполнялся в соответствии с методикой, описанной в [22], где

Таблица 1. Свойства компонентов исследуемых паст и бетонных смесей

№	Компонент	Истинная плотность, ρ , кг/м ³	Площадь удельной поверхности, $S_{уд}$, м ² /кг	Диаметр частицы, d_p , мкм
1	Портландцемент	3100	121,6	15,9
2	Микрокремнезем	2250	171,2	15,6
3	Кварцевая мука	2650	17,3	130,7
4	Фракц. песок	2650	3,3	694,6
5	Микросферы	580	169,7	61,0



Рис. 1. Ротационный вискозиметр MCR 101 с измерительной системой «шар»

в качестве реологического параметра рассматривалась вязкость смеси. Согласно данной методике, реологическая кривая делится на 3 участка (рис. 2), каждый из которых описывается трендовой линией. Коэффициенты уравнения, описывающие участки, характеризуют поведение исследуемой системы под действием осцилляции.

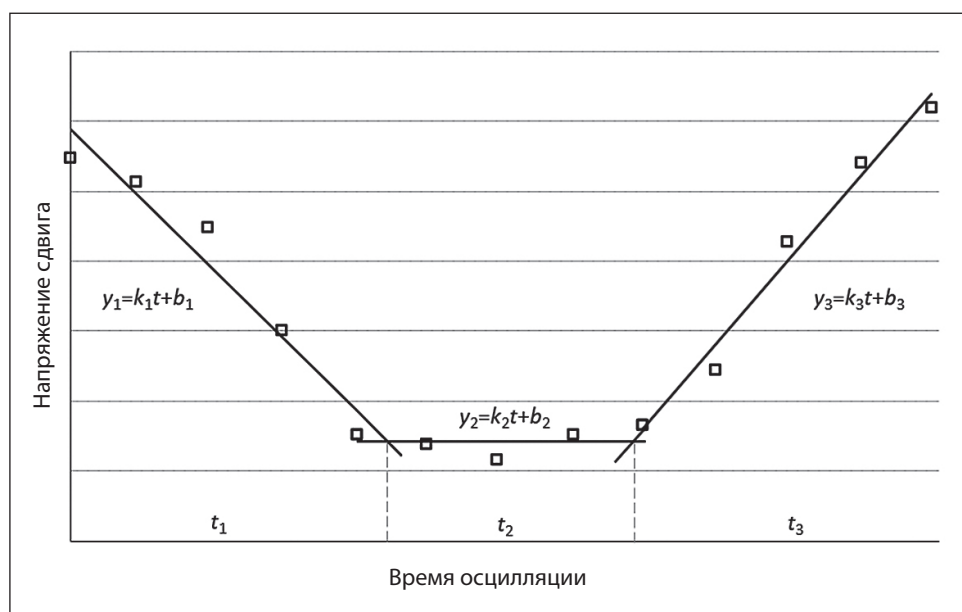


Рис. 2. Общий вид реологической кривой, полученной при осцилляции

Для анализа структуры исследуемых дисперсных систем использовались различные структурные параметры. Толщина водной оболочки h_b рассчитывается по известной формуле:

$$h_b = \frac{V_b}{S_f} = \frac{V_b}{S_{уд, f} \cdot m_f}, \quad (1)$$

где V_b – объем воды, S_f – суммарная удельная поверхность частиц, $S_{уд}$ – удельная поверхность частицы. При этом удельная поверхность может быть выражена упрощенной формулой (2) с учетом среднего диаметра частиц или с учетом вклада частиц различного размера (3):

$$S_{уд} = \frac{6}{d_f \rho_f}, \quad (2)$$

где d_f и ρ_f – диаметр и плотность частиц сухих компонентов соответственно, v – доля i -х частиц определенного диаметра. Для исследуемых смесей рассчитывались структурные параметры:

$$\frac{h_{цт}}{d_f} = \frac{v_{цт}/S_f}{d_f}, \quad (3)$$

где $v_{цт}$ и $h_{цт}$ – объем и толщина прослойки цементного теста соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При разработке самоуплотняющихся высокопрочных легких бетонов для решения задачи паритетного сочетания высокой текучести и однородности бетонной смеси важным является установление роли каждого из его компонентов в протекании указанных процессов. Ранее в [22] предложен подход, позволяющий под действием постоянного ос-

цилляционного воздействия установить изменение реологических свойств бетонных смесей. При этом изменяющийся характер кривой течения указывает на изменения в структуре исследуемой системы. Анализ выполняется путем деления кинетической зависимости на участки, описываемые различными трендовыми линиями. Коэффициенты этих прямых

позволяют судить об интенсивности преобразования структуры исследуемых дисперсных систем.

На рисунке 3 представлены зависимости напряжения сдвига от времени при постоянном вибрационном воздействии для цементных и цементно-минеральных паст различного состава с пластификатором и без него.

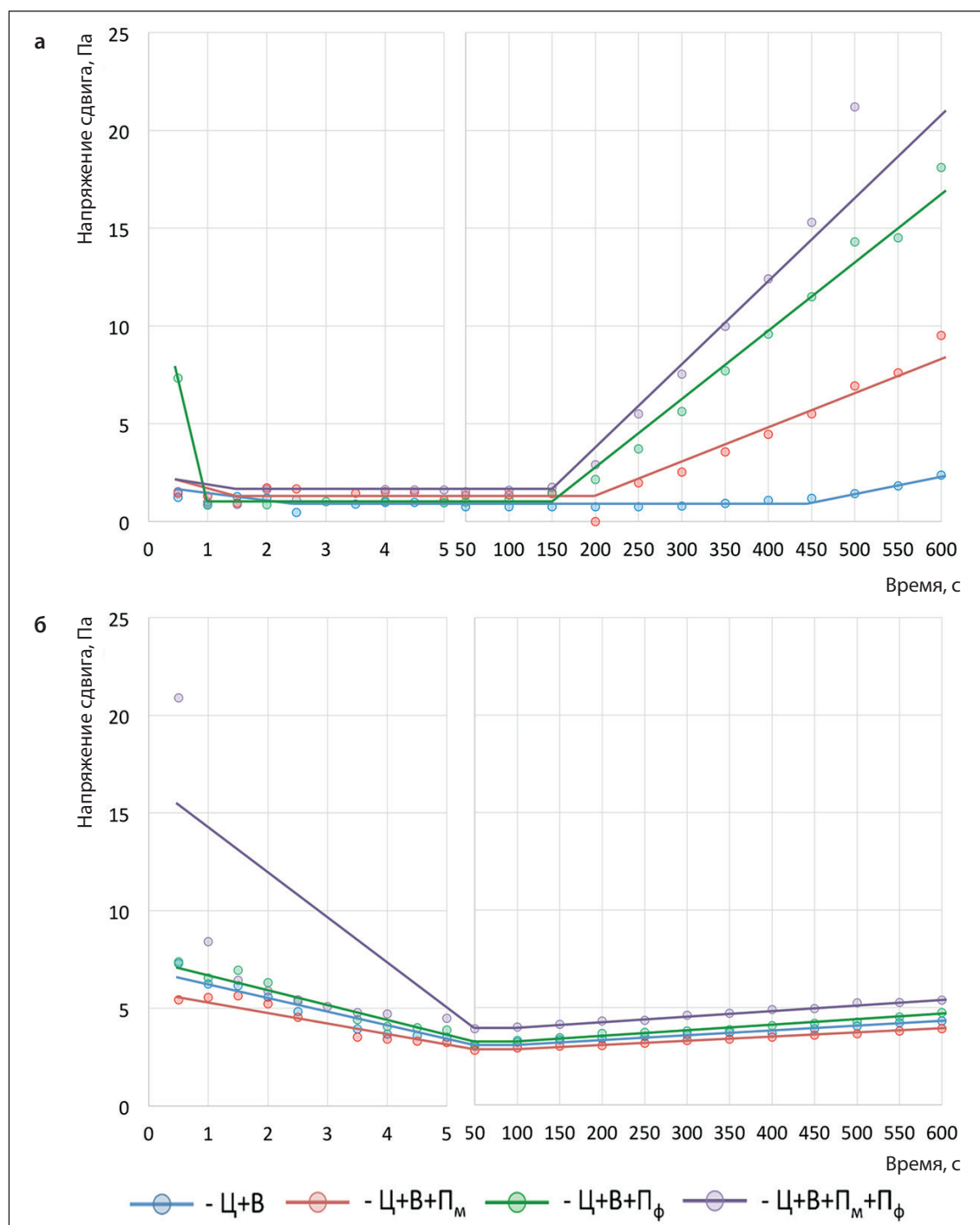


Рис. 3. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

На представленных графиках (рис. 3) в соответствии с методикой [22] выделены 3 участка, описываемые прямыми, коэффициенты которых представлены в таблице 2. На рис. 2 отчетливо видно существенное отличие кинетических зависимостей напряжения сдвига для пластифицированных и непластифицированных дисперсных систем. Так, для паст с пластификатором наблюдается непродолжительный (1,5...3,5 с) нисходящий участок 1, очевидно связанный с тиксотропным разжижением. Затем вибрационное воздействие не приводит к изменению напряжения сдвига. Этот участок 2 длится от 150 до 450 с, после чего фиксируется интенсивное приращение величины напряжения сдвига до значений, превышающих начальный предел текучести. Такое поведение может быть связано с переходом дисперсной системы из устойчивой коагуляционной структуры к неоднородной. То есть постоянное вибрационное воздействие приводит к нарушению однородности, например, расслоению пасты из-за сближения и формирования агрегатов плотных частиц, которые под действием силы тяжести стремятся к седиментации. При этом разбавление цементной пасты молотым или фракционированным песком сокращает участок 2.

Для исследуемых паст без пластификатора характерна другая зависимость напряжения сдвига от времени осцилляции. Так, напряжение сдвига имеет существенно большее начальное значение, что выражается более длительным участком 1. При этом начало восходящего участка 3 можно идентифицировать раньше, чем для этих же паст, но с пластификатором. А участок 2 слабо идентифицируется, что отчетливо наблюдается при анализе параметров трендовых линий, представленных в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что в пределах эксперимента продолжительность участка 3 для паст без пластификатора составляет 550 с, при котором приращение напряжения сдвига наступает при достижении близ-

ких значений напряжения сдвига, на что указывает $b_2 = 2,81...4,19$. При этом интенсивность приращения, описываемая k_3 , также имеет близкие значения 0,002...0,003. Подобное поведение исследуемых систем без пластификатора можно объяснить неравномерным распределением воды для смачивания частиц и отсутствием диспергирующего эффекта. Сравнительный анализ коэффициентов для каждого участка показывает роль пластификатора как в разжижении (b_1 составляет 1,38...13,8 против 6,39...26,4), так и в скорости нарушения однородности (k_3 на порядок выше) паст.

Анализ 1–4 строчки в таблице 2 показывает, что управлять реологией пластифицированных паст можно как с использованием разнодисперсных компонентов, так и с их комбинациями. Показано, что введение в пасту кварцевой муки приводит к незначительному загустеванию, но снижает продолжительность участка 2 с 450 до 250 с, то есть приводит к раннему нарушению однородности. Использование более крупных кварцевых частиц в пасте приводит к большей интенсификации описанного влияния. Большая плотность таких паст (b_1 в 10 раз больше) объясняется большим трением частиц кварцевого песка, а их размер (фр. 0,16–0,63 мм), превышающий размер как муки, так и портландцемента, способствует ускорению расслоения (k_3 увеличивается с 0,01 до 0,04). Такое влияние может быть нивелировано комбинацией Π_ϕ с Π_m . В этом случае пластифицированная паста, состоящая из портландцемента, воды и кварцевой муки, формирует прослойку между частицами фракционированного песка, снижая их трение. Однако увеличение доли кварцевых компонентов приводит к ускорению расслоения (k_3 увеличивается до 0,06) из-за снижения доли вяжущего, формирующего коагуляционную структуру исследуемой системы.

Таким образом, показано: варьирование компонентами дисперсной среды позволяет управлять реологическим поведением пасты. Снижение доли

Таблица 2. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

№	Наличие пластификатора	Маркировка состава	Участок 1			Участок 2		Участок 3			
			k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c	
1	Пл	Ц+В	–	–0,25	1,38	3,5	0,87	447	0,01	–2,47	150
2			+ Π_m	–0,51	1,74	1,5	1,48	248	0,02	–3,77	350
3			+ Π_ϕ	–13,0	13,8	1,0	0,94	149	0,04	–5,16	450
4			+ Π_m + Π_ϕ	–0,67	1,81	1,5	1,52	148	0,06	–10,4	450
5	–		–	–0,85	7,29	5,0	3,39	45	0,002	2,97	550
6			+ Π_m	–0,63	6,39	5,0	2,81	45	0,002	2,70	550
7			+ Π_ϕ	–0,84	7,73	5,0	3,01	45	0,003	3,04	550
8			+ Π_m + Π_ϕ	–14,5	26,4	1,5	4,19	45	0,003	3,73	550

вяжущего за счет наполнения кварцевым песком или тонкой минеральной добавкой снижает способность таких систем сохранять однородность. Особенно это существенно на пластифицированных цементных пастах. Чем крупнее частицы дисперсной фазы, тем интенсивнее процессы расслоения.

Известно, что использование тонких минеральных добавок позволяет повысить однородность дисперсных систем за счет высокой водоудерживающей способности. Влияние микрокремнезема на график кривой напряжения сдвига цементно-минеральных паст при осцилляции показан на рисунке 4.

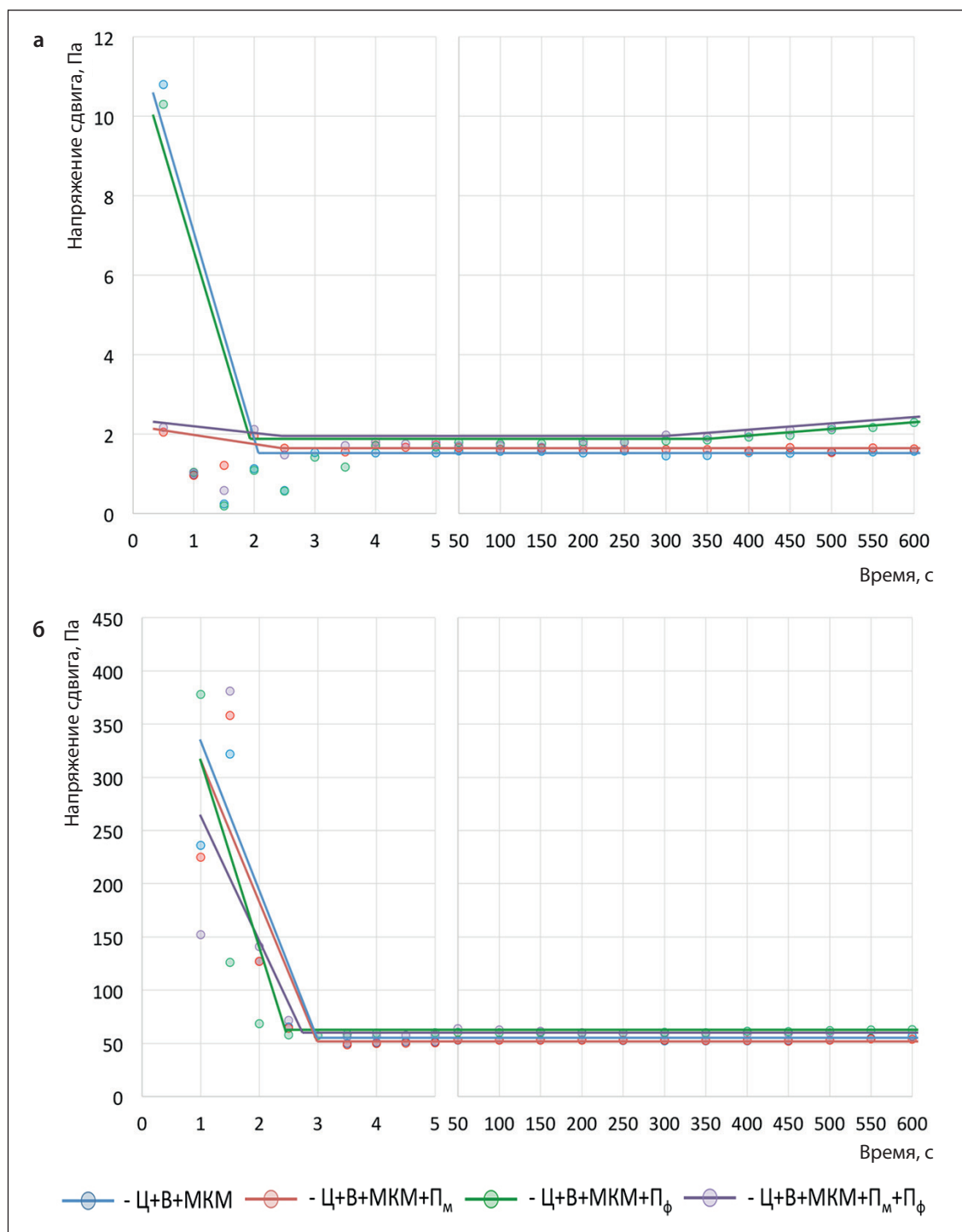


Рис. 4. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

Рисунок 4 показывает, что пластифицированные цементно-минеральные пасты с микрокремнеземом имеют низкую величину начального напряжения сдвига (менее 12 Па), близкую к значениям для паст без него, показанным на рис. 3 (менее 10 Па), в отличие от непластифицированных паст, где значения изменились на порядок (152...378 Па против 5,4...20,9 Па). На рис. 3б можно выделить пасты Ц+В+МКМ+П_м и Ц+В+МКМ+П_м+П_ф, несмотря на возможность выделить отдельные участки, характеризуются относительно низкой изменчивостью напряжения сдвига на протяжении всего периода осцилляционного воздействия, а именно в пределах 1,5...2,3 Па. При этом отсутствие молотого песка (синий и зеленый график на рис. 4а) в составе увеличивает величину начального напряжения сдвига. Также отметим, что системы с микрокремнеземом, с фракционированным песком (зеленый и фиолетовый график на рис. 4а) отличаются наличием восходящего участка на реологической кривой. То есть кварцевый песок выступает в качестве компонента, интенсифицирующего нарушение однородности структуры пасты. Однако для исследуемых систем интенсивность этого процесса незначительна.

Отсутствие пластификатора в исследуемых пастах с микрокремнеземом меняет особенности их реологического поведения (рис. 4б). Так, все виды паст отличаются отсутствием участка 3 в пределах продолжительности проводимого исследования. При этом разжижение вследствие осцилляционного воздействия протекает в схожих временных диапазонах (табл. 3).

Отметим, что увеличение вязкости паст за счет введения микрокремнезема отражается на интенсивности разжижения, которое наступает быстрее (через 2,5 с против 5 с). Однако такая смесь имеет более высокий коэффициент b_2 , который увеличился на порядок с 2,81...4,19 до 50,9...59,0.

Таким образом, можно сделать вывод о роли компонентов в исследуемых пастах для управления их свойствами. В пластифицированных цементно-минеральных пастах варьирование содержания кварцевой муки позволяет снизить передел текучести при сохранении однородности. Варьирование содержания крупной фракции кварцевого песка может быть использовано для управления тиксотропным разжижением цементных смесей, но следует учитывать их повышенное стремление к расслоению. Микрокремнезем позволяет стабилизировать структуру цементно-минеральных паст, в том числе пластифицированных.

Очевидно, что в исследуемых дисперсных системах на портландцементе или с кварцевым песком изменение структуры под действием вибрации будет протекать медленнее. Это связано с тем, что плотность дисперсной фазы, в качестве которой выступает фракционированный кварцевый наполнитель и дисперсионная среда (цементно-минеральная паста), имеют близкие значения. Введение полого наполнителя, такого как полые микросферы, приведет к снижению стабильности системы, стремление к расслоению которой будет наступать раньше. Однако обеспечить высокую текучесть, которой должны обладать самоуплотняющиеся бетонные смеси на полом наполнителе, без использования пластификатора, невозможно.

На рисунке 5 показано, что введение полых микросфер в пластифицированные и непластифицированные цементно-минеральные системы с микрокремнеземом способствует появлению восходящего участка кривой. Единственным составом без данного участка является Ц+В+МКМ+МС+П_м+П_ф. Также видно, что продолжительность периода стабильности больше у систем с пластификатором, где исключением является состав Ц+В+МКМ+МС+П_ф, где период сохранения однородности одинаков

Таблица 3. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

№	Наличие пластификатора	Маркировка состава	Участок 1			Участок 2		Участок 3			
			k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c	
1	Пл	Ц+В+МКМ	–	–19,6	20,6	2,0	1,54	598	–		
2			+П _м	–2,17	3,14	2,0	1,65	598	–		
3			+П _ф	–18,5	19,6	2,0	1,71	346	0,002	1,12	200
4			+П _м +П _ф	–2,30	3,32	2,0	1,74	297	0,001	1,56	300
5	–		–	–141,4	435	2,5	51,3	597	–		
6			+П _м	–142,7	443	2,5	50,9	597	–		
7			+П _ф	–203,6	514	2,5	59,0	597	–		
8			+П _м +П _ф	–96,4	354	2,5	59,0	597	–		

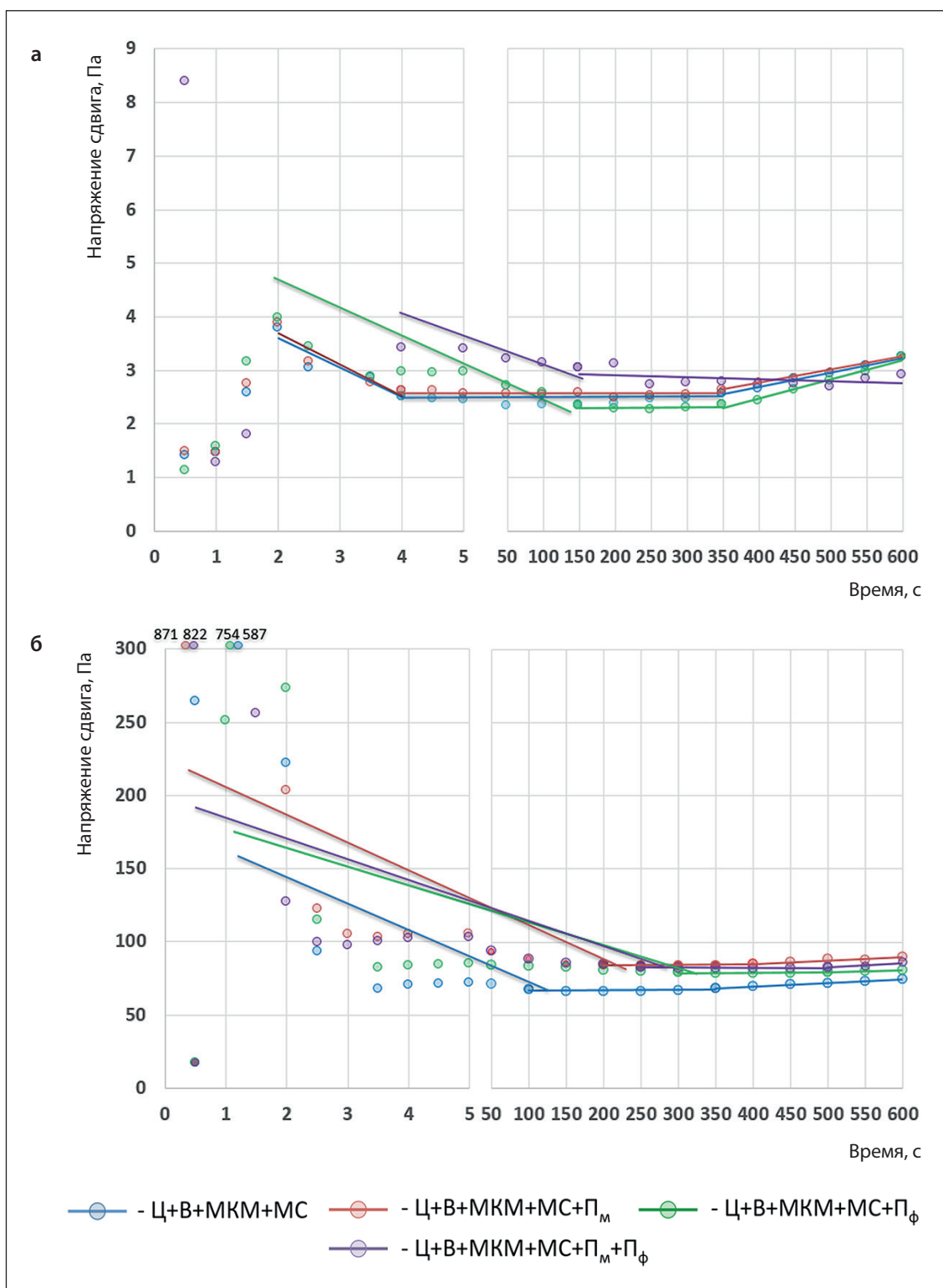


Рис. 5. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

с такой же по составу смесью без пластификатора. Это еще раз доказывает ранее упомянутый тезис о роли песка как компонента, интенсифицирую-

щего нарушение однородности структуры пасты. В непластифицированных системах введение кварцевого заполнителя разной дисперсности и объема

(P_m и P_ϕ) способствует смещению в большую сторону во времени начала расслоения, т.е. приводит к более позднему расслоению. В пластифицированных смесях изменение дисперсности заполнителя не приводит к изменению периода начала расслоения: участок № 3 для составов Ц+В+МКМ+МС, Ц+В+МКМ+МС+ P_ϕ , Ц+В+МКМ+МС+ P_m наступает при $t = 350$ с. Совместное введение заполнителей разной дисперсности (P_m+P_ϕ) способствует более позднему началу процесса расслоения. Для систем Ц+В+МКМ+МС+ P_m+P_ϕ в установленный период осцилляции ($t = 600$ с) момент наступления расслоения смеси не фиксируется.

Введение полых микросфер значительно меняет реологию исследуемых цементных паст с микрокремнеземом: как при использовании пластификатора, так и без. Практически все изучаемые системы с микросферами имеют участок 3 (рис. 5б) в пределах продолжительности проводимого исследования. Разжижение вследствие осцилляции протекает в схожих временных диапазонах для пластифицированных систем, кроме состава с P_m+P_ϕ , и в разных диапазонах для систем без пластификатора, где уменьшение участка 3 происходит за счет увеличения крупности кварцевого заполнителя (табл. 4).

Особенностью реологического поведения смесей на полых микросферах является наличие короткого промежутка в начальный период времени, когда под колебательным воздействием измерительной системы реометра фиксируется увеличение напряжения сдвига. Объяснение такого характера изменения и его значимость требуют дополнительного исследования.

Таким образом, установлено, что многокомпонентные дисперсные системы обладают сложным реологическим поведением. Введение легкой мелкодисперсной фазы стабилизирует систему и пре-

пятствует расслоению на определенный период времени.

Очевидно, что реологическое поведение дисперсных систем связано с формированием определенной структуры. Свойства такой структуры зависят от параметров, которые достигаются варьированием рецептурных факторов. К таким параметрам структуры для цементно-минеральных паст и бетонных смесей относят объем цементного теста, толщину водной прослойки, размеры частиц дисперсной фазы, коэффициент раздвижки зерен или расстояние между частицами дисперсной фазы и др. [5]. В таблице 5 представлены некоторые структурные параметры исследуемых смесей.

Варьирование рецептуры цементно-минеральной пасты или бетонной смеси приводит к формированию структуры, которую можно описать различным параметром. В таблице 5 это наглядно продемонстрировано. Установление зависимости реологических свойств дисперсной системы от ее параметров структуры позволит определить рецептурные факторы, позволяющие ими управлять. В таблице 6 представлены результаты корреляционного анализа реологических параметров для некоторых исследуемых дисперсных систем.

Установлено, что параметры k_1 , b_1 , b_2 систем, описывающие направление изменения напряжения сдвига при осцилляции, с пластификатором и без него, имеют хорошую корреляцию с некоторыми параметрами структуры. Из таблицы 5 видно, что в системах без пластификатора чувствительным структурным параметром, для которых характерен высокий коэффициент корреляции $|r| > 0,70$, является толщина водной прослойки, объем цементного теста и толщина цементного теста. Однако это характерно только для параметра b_2 , описывающего величину напряжения сдвига,

Таблица 4. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

№	Наличие пластификатора	Маркировка состава	Участок 1			Участок 2		Участок 3			
			k_1	b_1	t_1, c	b_2	t_2, c	k_3	b_3	t_3, c	
1	Пл	Ц+В+МКМ+МС	-	-0,55	4,69	2,0	2,41	346	0,003	1,59	250
2			+ P_m	-0,58	4,85	2,0	2,58	346	0,002	1,79	250
3			+ P_ϕ	-0,01	3,21	148	2,28	200	0,004	1,04	250
4			+ P_m+P_ϕ	-0,003	3,4	146	3,0	454	-	-	-
5	-	Ц+В+МКМ+МС	-	-1,33	172,4	98,5	66,6	251,5	0,02	59,8	250
6			+ P_m	-1,12	251,4	199	83,0	201	0,02	75,3	200
7			+ P_ϕ	-0,53	195,4	299	78,8	201	0,01	74,0	100
8			+ P_m+P_ϕ	-0,65	203,8	249	82,6	251	0,03	66,0	100

Таблица 5. Структурные параметры цементно-минеральных паст

№	Дисперсная		$\Sigma S, \cdot 10^3 \text{ м}^2$	$h_b, \text{ мкм}$	$v_{\text{цт}}$	$S_r, \cdot 10^3 \text{ м}^2$	$h_{\text{цт}}, \text{ мкм}$	$h_{\text{цт}}/d_f$
	среда	фаза						
1	Ц+В	Π_m	72,5	8,03	0,96	0,9	1010	7,72
2		Π_ϕ	72,1	7,46	0,89	0,5	1653	2,38
3		МКМ	83,1	6,88	0,94	11,5	81,8	5,25
4		МС	111,2	2,98	0,55	39,7	13,7	0,23
5		$\Pi_m + \Pi_\phi$	73,0	7,10	0,85	1,48	575	1,39
6		$\Pi_m + \text{МКМ}$	84,0	6,54	0,91	12,5	72,6	0,99
7		$\Pi_m + \text{МС}$	112,2	2,88	0,53	40,6	13,1	0,14
8		МКМ+ Π_ϕ	83,6	6,10	0,84	12,0	69,7	0,20
9		МКМ+МС	122,7	2,61	0,53	51,2	10,3	0,27

Таблица 6. Коэффициент корреляции между структурными и реологическими параметрами

Параметр	С пластификатором				Без пластификатора			
	h_b	$v_{\text{цт}}$	$h_{\text{цт}}$	$h_{\text{цт}}/d_f$	h_b	$v_{\text{цт}}$	$h_{\text{цт}}$	$h_{\text{цт}}/d_f$
k_1	-0,35	-0,40	-0,11	-0,17	-0,33	-0,50	0,42	0,09
b_1	0,17	0,23	0,03	0,09	0,18	0,37	-0,54	-0,15
b_2	-0,91	-0,88	-0,72	-0,56	-0,28	-0,09	-0,68	-0,35

соответствующую предельному разжижению смеси. Однако для дисперсных систем с пластификатором наибольший коэффициент корреляции наблюдается между $h_{\text{цт}}$ и b_2 , что указывает на некорректность их использования для рассматриваемых смесей и параметров.

Таким образом, показано, что распространенные структурные параметры, используемые для описания дисперсных систем, имеют ограниченную применимость. Так, для густых смесей выбранные структурные параметры могут быть использованы для оценки интенсивности разжижения, а для текучих смесей – для оценки предельной величины разжижения. Однако стоит отметить, что ни один из указанных структурных параметров, рассчитанных по известным рецептурным формулам, не учитывает вклад пластификатора. То есть и распределение воды (h_b), и объем цементного теста ($v_{\text{цт}}$), который от него зависит, для системы с пластификатором и без него представляется идентичным структурным параметрам. В связи с этим для пластифицированных дисперсных систем, таких как бетонные смеси самоуплотняющихся бетонов, требуются параметры, учитывающие роль пластификатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований установлено, что пластифицированные многокомпонентные дисперсные системы обладают сложным реологическим поведением, которое указывает на особенности формирования структуры в присутствии ПАВ. Показано, что наполнение цементных систем более крупными компонентами снижает способность таких паст сохранять однородность. Большая доля тонких компонентов, таких как кварцевая мука или микрокремнезем, повышают однородность как пластифицированных, так и непластифицированных цементно-минеральных систем. Установлено, что полые микросферы существенно меняют реологию цементных паст, выраженную повышенной склонностью к расслоению. Корреляционный анализ показал некорректность использования традиционных структурных параметров дисперсных систем для описания их свойств, особенно с пластификатором. Традиционно применяемые параметры структуры (например, толщина водной прослойки или толщина прослойки цементного теста) не учитывают свойства дисперсных фаз и жидкости в системе. Это указывает на необходимость поиска таких критериев.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батыновский Э.И., Бондарович А.И., Калиновская Н.Н., Рябчиков П.В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона. *Наука и техника*. 2021;20;4:329–337. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337>
2. Ларсен О.А., Бахрах А.М., Машина Т.Ю. Органоминеральный модификатор на основе шламовой воды для получения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов. *Техника и технология силикатов*. 2024;31;4:365–376. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-365-376> – EDN: MJUPXW.
3. Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Санягина Я.А., Христофорова И.А. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органическими добавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16;6: 510–524. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524> – EDN: QQDQLS.
4. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей. *Инженерно-строительный журнал*. 2012;8(34):47–53. <https://doi.org/10.5862/MCE.34.7> – EDN: PJWLHF.
5. Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей. *Строительные материалы*. 2020;4-5:90–96. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96> – EDN: CVBCCH.
6. Al-Khaiat H., Naque M.N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 1998.28.6:859–866 [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00051-9) – EDN: ABJIXX
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодов И.М. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях. *Бетон и железобетон*. 2025;3(628):52–68. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68) – EDN: SWWFTR.
8. Zhang Y.H., Wang H., Zhong W.L., Fan L.F. Development of a high-strength lightweight geopolymer concrete for structural and thermal insulation applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03949. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03949>
9. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях. *Строительные материалы*. 2024;7:41–47. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47> – EDN: UNEDCX
10. Inozemtcev A.S., Epikhin S.D. The effect of dense and hollow aggregates on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Materials*. 2024;17;18:4569. <https://doi.org/10.3390/ma17184569> – EDN: SPPCRB.
11. Dengwu J., Caijun Sh., Qiang Y., Xiaopeng A., Yu L., Huang L. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—A review. *Cement and Concrete Composites*. 2017;83:146–159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
12. Lee S. H., Kim H. J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003;33;5:763–768. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01054-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01054-2)
13. Miguel C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, Sandrine F. Pereira. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;166:373–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>
14. Biricik Ö., Mardani A. Parameters affecting thixotropic behavior of self-compacting concrete and 3D printable concrete; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2022; 339: 127688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127688>
15. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах. *Строительство: наука и образование*. 2024;14;1:18–24. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.9>
16. Городецкий И.Ю., Сердюченко В.М. Особенности использования самоуплотняющегося бетона. *The scientific heritage*. 2021;72-2(72):3–5. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5> – EDN: G GKADP.
17. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Евсеева Т.М., Соболев К.Г., Потапов В.В. Литые бетоны с использованием отходов меде плавильного производства и нанокремнезема. *Вестник МГСУ*. 2017;12;9(108):1010–1018. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.9.1010-1018> – EDN: ZHKODZ.
18. Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010;24;1:11–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.004>

19. Wu Z., Zhang Y., Zheng J., Ding Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):2087-2092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.023>
20. Behnam V., Shami N. Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2016;4:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.10.002>
21. Peng Y., Unluer C. Advances in rheological measurement and characterization of fresh cement pastes. *Powder Technology*. 2023;429:118903. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118903>
22. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Однородность самоуплотняющихся лёгких бетонных смесей на полых микросферах. *Техника и технология силикатов*. 2025;32;4:369-379. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-369-379> – EDN: OQZMLA.

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

Епихин Сергей Дмитриевич – аспирант, преподаватель, кафедра строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, epikhinsd@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0193-1904>

Иноземцев Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, InozemcevAS@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7807-688X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Епихин С.Д. – выполнение экспериментальных работ; подготовка текста статьи; формулирование выводов.

Иноземцев А.С. – научное руководство; постановка цели и задач исследования; анализ и экспертиза результатов; формулирование выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 02.04.2026.

Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system

Sergey Yu. Andronov¹ , Yuri E. Vasiliev² , Andrey V. Kochetkov^{2,3} , Pavel A. Slepnev⁴ , Ilya A. Chizhikov⁴ 

¹ Saratov Regional Branch of the Russian Academy of Transport, 410015, Saratov, Barnaulskaya St., 2 "b", bldg. 8, Russian Federation

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation

³ Perm National Research Polytechnic University, 614000, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, Russian Federation

⁴ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: slepnevpa@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The fractional composition of the stone filler in asphalt concrete mixtures and the preparation modes of the binder in the "bitumen – mineral powder" system have a significant impact on the performance characteristics of asphalt concrete mixtures. Considering that the filler volume of asphalt concrete mixtures reaches 96% by weight or 87% by volume of the mixture, and the binder volume is up to 4% by weight or up to 13% by volume. During the preparation of the asphalt concrete mixture, efforts are made to achieve its homogeneity and ensure complete coverage of the filler with binder. However, a lack of binder leaves voids, which lead to increased water absorption. **Materials and methods.** Based on optical studies of the fractional composition of a standard asphalt concrete mixture, the areas of interphase interaction between the stone filler and bitumen were determined, consistent with the results of other researchers. Based on the analysis of experimental and theoretical studies, the dependences of the interaction coefficient in the "bitumen – mineral powder" system on the dispersion composition, temperature, and filling degree were established. **Results and discussion.** Analysis of the obtained data proves that the interaction between bitumen and mineral powder follows certain patterns and depends on the volumetric particle size distribution within the mineral powder fractions, which determines the interfacial surface area of interaction. The optimal conditions for mixing temperature and composition filling are: temperature from 160 °C to 170 °C, volume fraction of 0.17–0.2. **Conclusion.** The selected asphalt concrete mixture formulation, which was studied in this study and contains a volume fraction of micropowder at the level of 0.258, must be adjusted upwards by increasing the bitumen mass to 2.0 kg in order to achieve the optimum interaction between mineral powder and bitumen. The obtained results allow for adjustments to the asphalt concrete mixture composition in order to improve its performance characteristics.

KEYWORDS: porosity of aggregates, bitumen adhesion, bitumen adsorption by particles, mineral powder, compacted asphalt concrete mixture, asphalt concrete structure modeling

ACKNOWLEDGMENTS: This article is dedicated to the memory of our colleague, Doctor of Engineering Sciences, Professor Alexander Alexandrovich Artemenko, who worked at the Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University. The authors express their gratitude to him for his consultations during its preparation.

FOR CITATION:

Andronov S.Yu., Vasiliev Yu.E., Kochetkov A.V., Slepnev P.A., Chizhikov I.A. Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок»

Сергей Юрьевич Андронов¹ , Юрий Эмануилович Васильев² , Андрей Викторович Кочетков^{2,3} , Павел Алексеевич Слепнев^{4*} , Илья Александрович Чижиков⁴ 

¹ Саратовское региональное отделение Российской академии транспорта, 410015, Саратов, ул. Барнаульская, 2 «б», к. 8, Российская Федерация

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Фракционный состав каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и режимы приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок» оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных смесей. Учитывая, что объем наполнителя асфальтобетонных смесей достигает 96% по массе или 87% по объему смеси, а объем связующего составляет до 4% по массе или до 13% по объему, в процессе приготовления асфальтобетонной смеси стремятся добиться ее однородности и обеспечить полное покрытие наполнителя связующим. Однако при недостатке связующего остаются пустоты, которые приводят к увеличению водопоглощения. **Материалы и методы.** На основании оптических исследований фракционного состава стандартной асфальтобетонной смеси определены площади межфазного взаимодействия между каменным наполнителем и битумом, согласующиеся с результатами других исследователей. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости коэффициента взаимодействия в системе «битум – минеральный порошок» от дисперсионного состава, температуры и степени наполнения. **Результаты и обсуждение.** Анализ полученных данных доказывает, что взаимодействие битума и минерального порошка подчиняется определенным закономерностям и зависит от объемного распределения по размерам частиц во фракциях минерального порошка, что определяет площадь межфазной поверхности взаимодействия; температуры смешения и степени наполнения композиции – оптимальные условия: температура от 160 °С до 170 °С, объемная доля 0,17–0,2. **Заключение.** Выбранную рецептуру асфальтобетонной смеси, которая исследовалась в работе и содержит объемную долю микропорошка на уровне 0,258, необходимо откорректировать в сторону увеличения массы битума до 2,0 кг с тем, чтобы попасть в оптимум по взаимодействию минерального порошка и битума. Полученные результаты позволяют скорректировать состав асфальтобетонной смеси с целью повышения ее эксплуатационных характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пористость каменных материалов, адгезия битума, адсорбция битума частицами, минеральный порошок, уплотненная асфальтобетонная смесь, моделирование структуры асфальтобетона

БЛАГОДАРНОСТИ: Статья посвящена светлой памяти нашего коллеги доктора технических наук, профессора Артеменко Александра Александровича, работавшего в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина. Авторы статьи выражают ему признательность за проведенные консультации при ее подготовке.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Кочетков А.В., Слепнев П.А., Чижиков И.А. Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок». *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

INTRODUCTION

The process of asphalt concrete mixtures (ACMs) design is primarily focused on selecting the granulometric com-

position of the stone material – the filler – that ensures maximum filling of the mixture volume. This provides the pavement with resistance to loads and deformations occurring during service. Generally, the filler content

reaches 94–96% by weight or 85–87% by volume of the mixture. Subsequent compaction at high temperatures, when the binder – bitumen – is in a fluid state, makes it possible to generally meet modern requirements for road pavements. However, analysis of existing regulatory documents and practical studies indicates that pavements exhibit certain deficiencies that manifest under adverse conditions and lead to their deterioration. Primarily, this concerns such a standardized characteristic as water absorption.

The current state of the art in this research area is generally reflected in the list of references [1–21]. The well-known domestic works in the direction of the present article are present in references [1–12]. The authors' own publications are illustrated by works [13, 14]. Foreign publications are represented in the list [14–21].

A proper distribution of the binder, which means a continuous film, formed by bitumen, covering all particles of the stone material, is out for in the production of ACMs. Otherwise, in the case of insufficient bitumen content, complete coverage of each particle with a bitumen film does not occur, which facilitates moisture penetration through uncovered areas, stripping of the bitumen film, and subsequent deterioration of the asphalt concrete pavement. On the other hand, an excess of bitumen leads to its displacement from regions of increased stress (during compaction) and the formation of zones with lower density of stone material distribution, which impairs the strength and durability of the asphalt concrete pavement.

At first glance, when analyzing the composition of asphalt concrete components, it can be noted that the binder – bitumen – is a hydrophobic material and cannot absorb water without special treatment. The situation is different with fillers – crushed stone, sand, and mineral powder. These stone materials have surface pores and are capable of water absorption. The industrial technology of asphalt mixture preparation provides that, during mixing at high temperature, bitumen should completely cover the surfaces of particles, be adsorbed into the pores, and prevent external moisture from entering the mixture after paving and compaction.

It should be noted that such a high filling degree with a minimum amount of binder requires an assessment of capability for a continuous film formation on the surface of filler particles and an analysis of the asphalt concrete characteristics in the case of its insufficiency. Furthermore, it is necessary to take into account that the bitumen film covering the particles is unevenly distributed in thickness due to the uneven surface topography of the particles and their size and nature [1]. The effective volume of the filler increases, due to the adsorptive interaction between bitumen and mineral particles in ACMs. Particles ranging in size from 3 to 10 mm have their thickness of the adsorption layer varying within 1.2–17 μm.

It is necessary to determine the surface area of particles of different shapes and sizes to evaluate the film thickness for a selected ACM recipe, which represents a serious challenge within existing research methods. Quite often, such measurements are performed by analyzing particles from light microscopy photographs. However, it should be noted that microscopic images allow visualization of only two-dimensional projections of particles, therefore, the dimensions of irregularly shaped particles could be described by several parameters and aspects: maximum or minimum diameter (linear size), maximum length, minimum length, volume, surface area, etc. Consequently, sizes obtained by different methods would differ. Figure 1 illustrates possible answers to the question of what constitutes particle size, expressed in the form of equivalent spheres. At the same time, there are no erroneous results – each answer is subjectively correct, as it reflects a physically measurable aspect [2, 9, 10].

The theory of the equivalent sphere states, that by measuring certain characteristics of a particle, it is assumed that they correspond to those of a sphere; then a universal number (the diameter of this sphere) is calculated. This number characterizes the given particle. This example clearly demonstrates that there is no need to describe the particle size with three or more numerical values, which, of course, would express the size more accurately but are complex and inconvenient when designing mixtures.

Proposed calculation procedure allows, in a short time, to model a presumably optimal particle size distribution by operating solely with the mass fraction ratios of the initial components in the mixture.

MATERIALS AND METHODS

Studies of the stone material particles in asphalt concrete mixtures (ACMs) using the equivalent sphere method were conducted after dispersion analysis of each asphalt concrete fraction (crushed stone, screenings, sand, mineral powder). A standard ACM was taken as the research object, with its composition displayed in Table 1.

Since each fraction mass in the mixture is strictly dosed, it is possible to approximately estimate the number of spheres with equivalent surface area per each size group (n_i), as well as their total surface area (s_i), by knowing the dispersion composition and material density (ρ).

By summing the areas of each fraction, the estimated surface area of the stone material particles in an asphalt concrete mixture of a given mass (S) is obtained. The following classical geometric formulas were used in the calculations:

$$\begin{aligned} \text{volume of the } i\text{-th sphere: } V_i &= \pi \cdot (D_i^3) / 6 \\ \text{mass of the } i\text{-th sphere: } m_i &= \rho \cdot V_i = \rho \cdot \pi \cdot (D_i^3) / 6 \\ \text{number of spheres in each fraction: } n_i &= k_i \cdot M_i / m_i, \end{aligned}$$

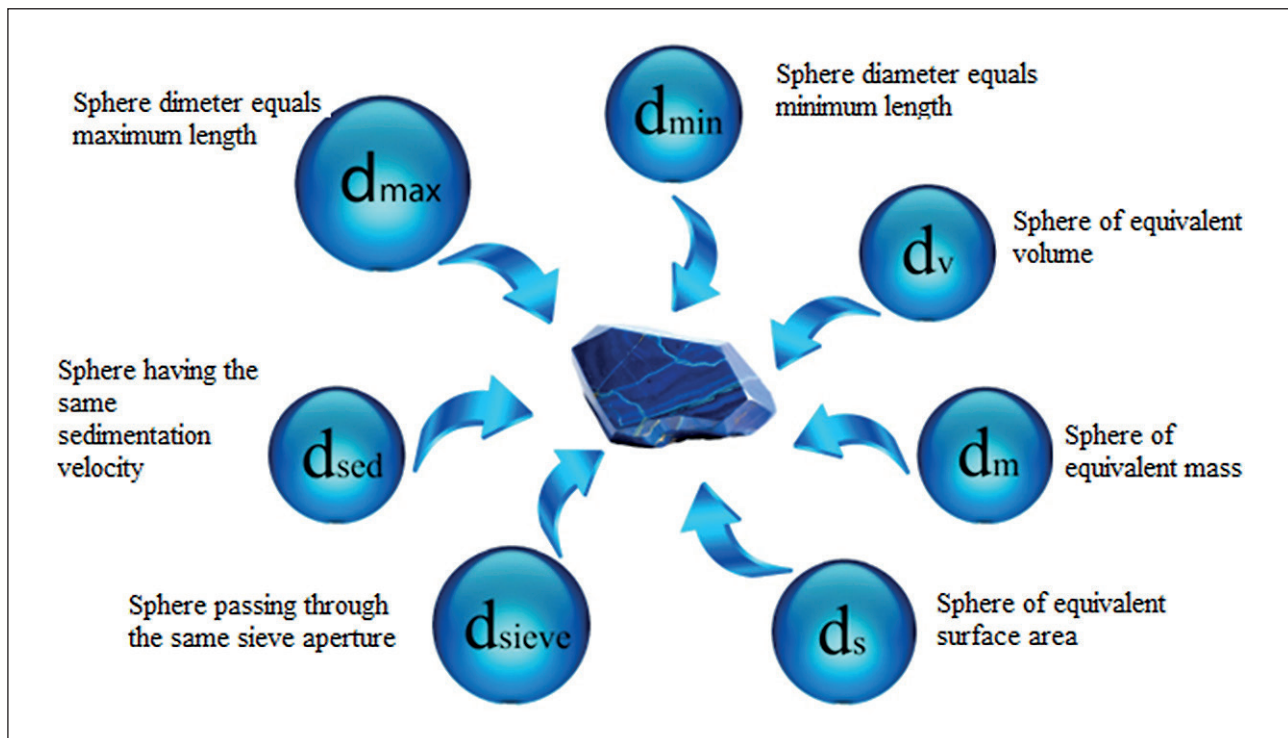


Fig. 1. Equivalent sphere diameters [2]

Table 1. Composition of asphalt concrete mixture Grade I Type B

No.	Material	Content, %
1	Crushed stone fraction 5–15	41.7
2	Sand from crushing screenings	43.7
3	Fine natural sand	4.7
4	Mineral powder MP-1	4.7
5	Bitumen grade BND 60/90	5.2
Total		100.0

where k_i , m_i – proportion and mass of the i -th size group, M_i – mass of the fraction;
 surface area of a sphere: $s = \pi \cdot D^2$
 surface area of the i -th fraction:

$$s_i = n_i \cdot \pi \cdot D_i^2 = k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 /$$

$$/m_i = \frac{k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 \cdot 6}{\rho \cdot \pi \cdot D_i^3}$$

with a stone material density $\rho \sim 2700 \text{ kg/m}^3$ this simplifies to:

$$s_i = \frac{6 \cdot 10^3}{2700} \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i} = 2,22 \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i},$$

the total surface area of all fractions $S = \sum s_i$.

The dispersion composition of each ACM fraction was studied using electron micrographs obtained from a light microscope. Image analysis was performed in the “DG Analyzer 1.5” software, which supports binarization of images – i.e., setting thresholds for light and dark areas in the picture and analyzing the resulting objects (Fig. 2). The software provides statistical processing results in both numerical and graphical forms. The program calculates the relative number of white pixels, perimeter and area of microstructural elements, average reduced diameters of elements, and detects the orientation of light areas.

The dispersion composition of the ACM, consisting of various fractions of stone material, is displayed in Figures 3–6.

RESULTS AND DISCUSSION

The theoretical estimation results of the ACM fractions surface areas are displayed in Table 2. The average size range value for each volume fraction were selected as diameters D_i on the histograms – for example, in the range of 50–70 μm , the average equivalent diameter was taken as $(50+70)/2 = 60 \mu\text{m}$.

Obtained calculation results are consistent with the data from works [4, 7, 8, 11, 12], indicating that the formation of the interphase boundary “bitumen – stone particles” in ACMs is achieved due to the mineral powder (MP).

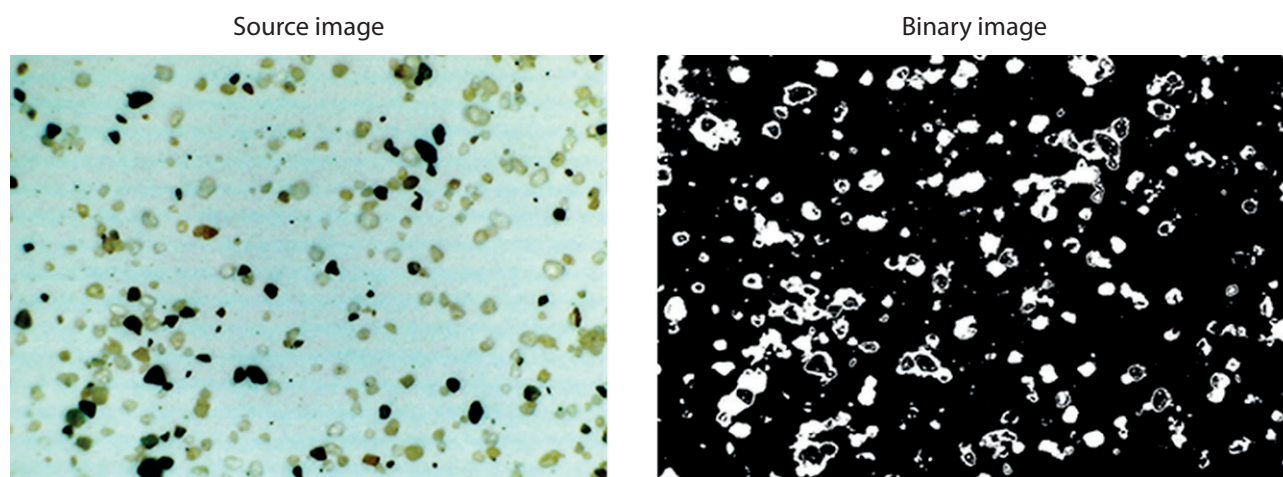


Fig. 2. “Sand” image (25 times magnification)

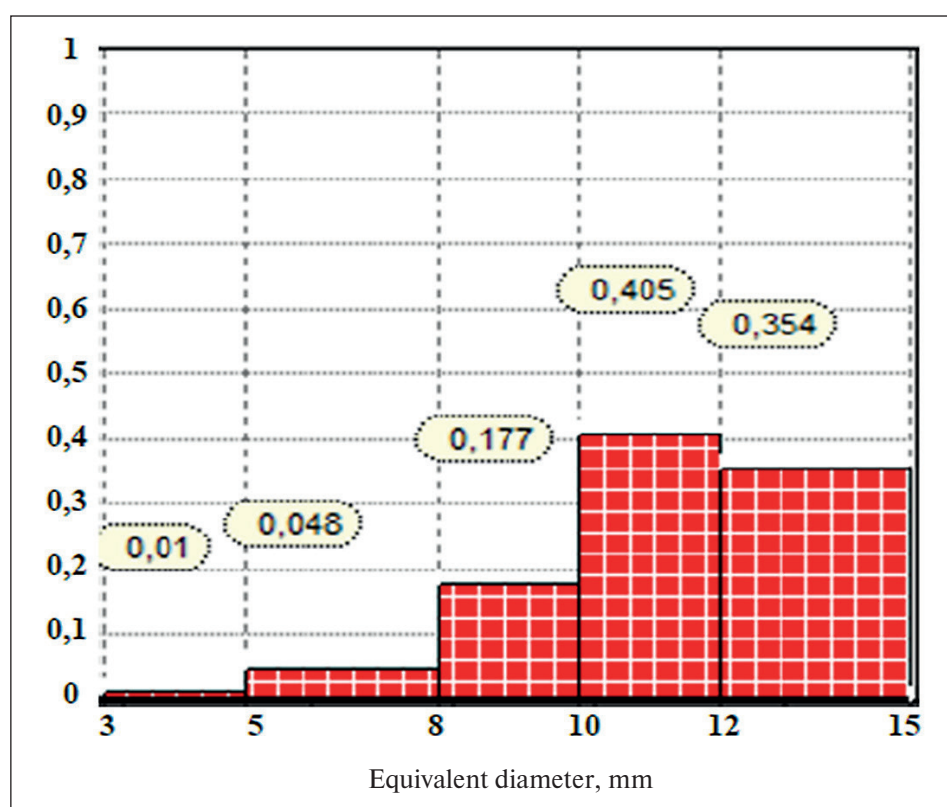


Fig. 3. Histogram of volume fraction versus particle diameter for crushed stone

The infusion of mineral powder into bitumen increases the viscosity of the latter and the strength of the pavement. As the MP concentration increases, the thickness of the bitumen film between mineral grains decreases, and the binder gradually transitions into a structured state. With increasing MP concentration, the bitumen film thickness between mineral grains decreases, and the binder progressively converses into a structured state [4].

As a result, the distance between particles decreases to a level at which the properties of the “bitumen – particles” system are determined by the interaction energy of the adsorption-solvation layers of the organic binder on the MP surface [4]. Furthermore, MP obtained from marble and dolomite rocks possesses a high positive potential with a large number of adsorption centers in the form of Ca^{2+} and Mg^{2+} cations, which contributes to a more intensive transition of bitumen into a struc-

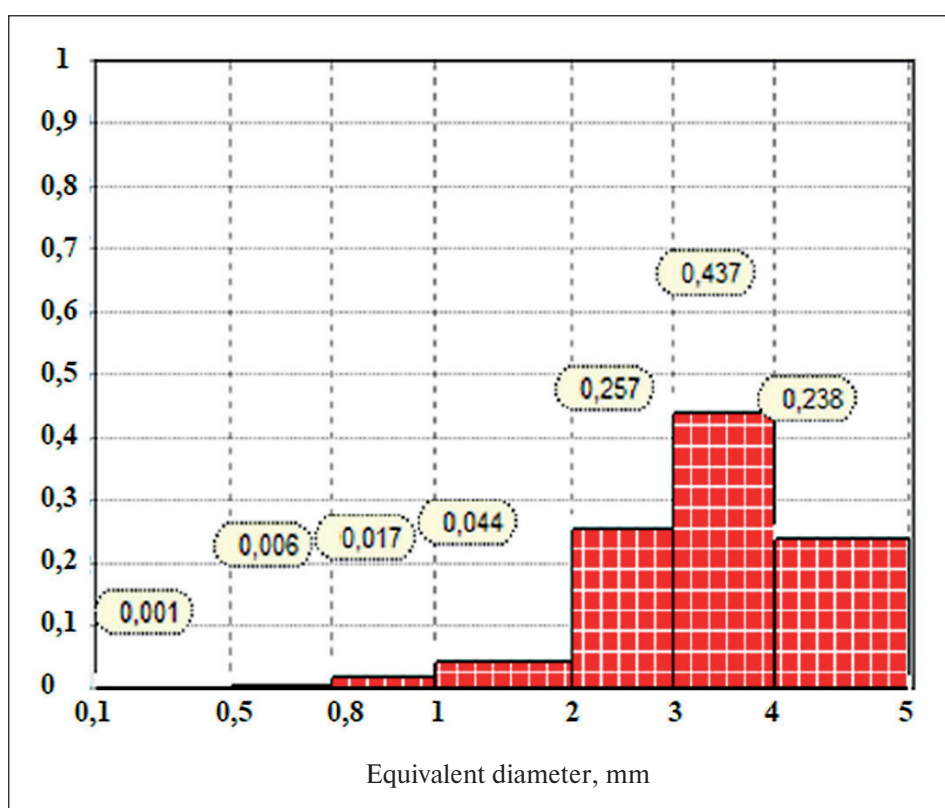


Fig. 4. Histogram of volume fraction versus particle diameter for crushing screenings

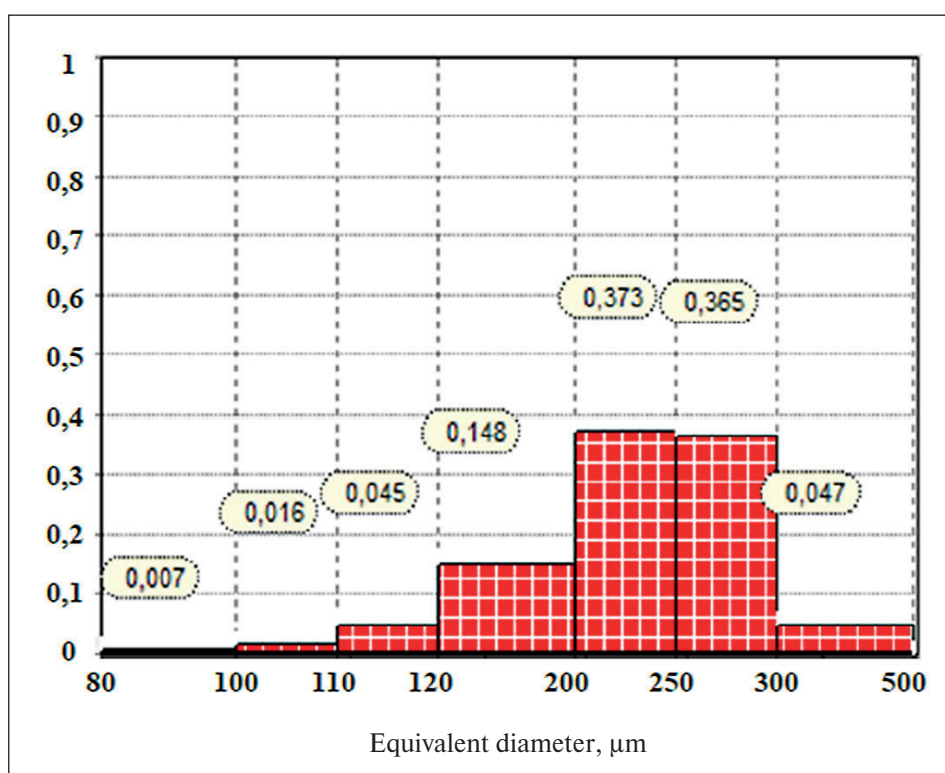


Fig. 5. Histogram of volume fraction versus particle diameter for sand

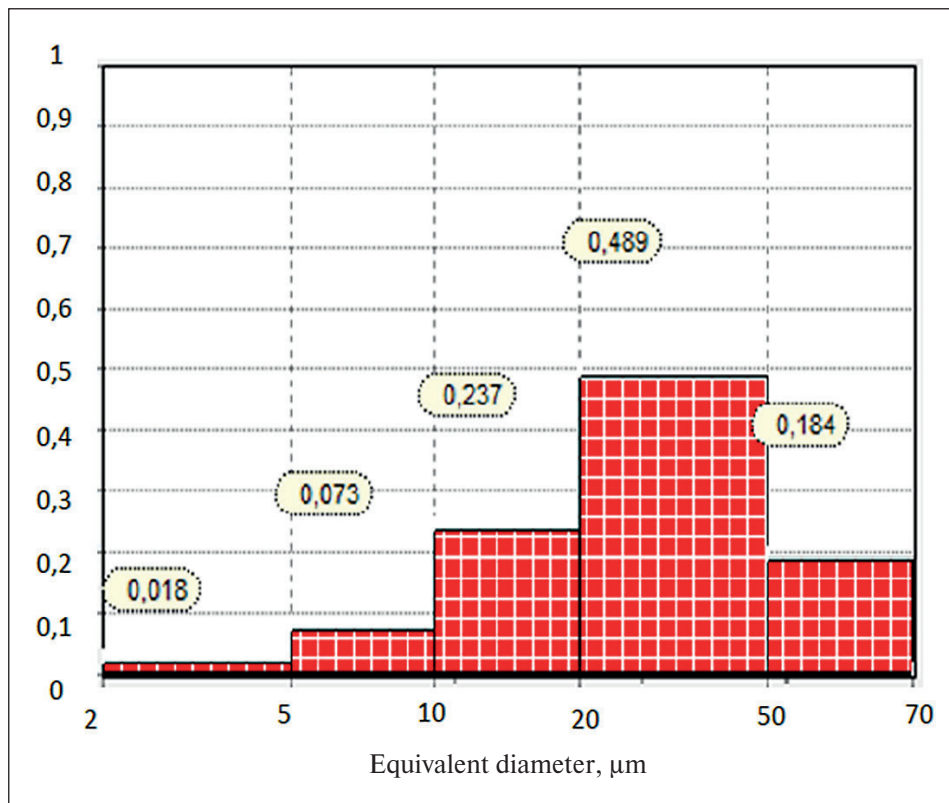


Fig. 6. Histogram of volume fraction versus particle diameter for MP-1 mineral powder

tured state with the formation of chemisorption bonds. These bonds enable firm retention of bitumen films on the surface, thereby increasing the strength of the asphalt binder [5].

The infusion of mineral powder into bitumen at high temperature leads to the formation of a suspension with a polyfractional composition. The suspension is a mixture of substances in which the solid phase is distributed as finest particles in the liquid phase in a suspended (non-settled) state [6]. The viscosity of such a system depends on the ratio of the volume concentrations of the filler particles (MP) and the liquid phase, the shape of the solid particles, their size distribution, the viscosity of the liquid medium (bitumen), and the nature of the interaction between the solid and liquid phases.

The analysis of mechanisms determining the rheological characteristics of the MP suspension in bitumen was performed. A model representing particles as spheres and based on the data obtained from dispersion analysis (Fig. 6) was used for the analysis. A rotational viscometer Rheotest RV2.1 was used for carrying out testing of suspensions at temperatures of 130–170°C, corresponding to the bitumen and MP mixing regimes.

The Mooney equation was used to calculate the viscosity of the “bitumen – solid spherical particles” system. The equation shows satisfactory coherence with experimental data for concentrated suspensions [8, 9]:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp \left[\frac{K_{int} \cdot \Phi}{\Phi_{max} - \Phi} \right], \quad (1)$$

where: η – effective viscosity of the suspension, Pa·s;
 η_0 – effective viscosity of the dispersion medium, Pa·s;
 K_{int} – coefficient accounting for the interaction of solid particles with the dispersion medium and among themselves;

Φ_{max} – maximum volume concentration of the filler, m^3/m^3 ;

Φ – volume concentration of the filler, m^3/m^3 .

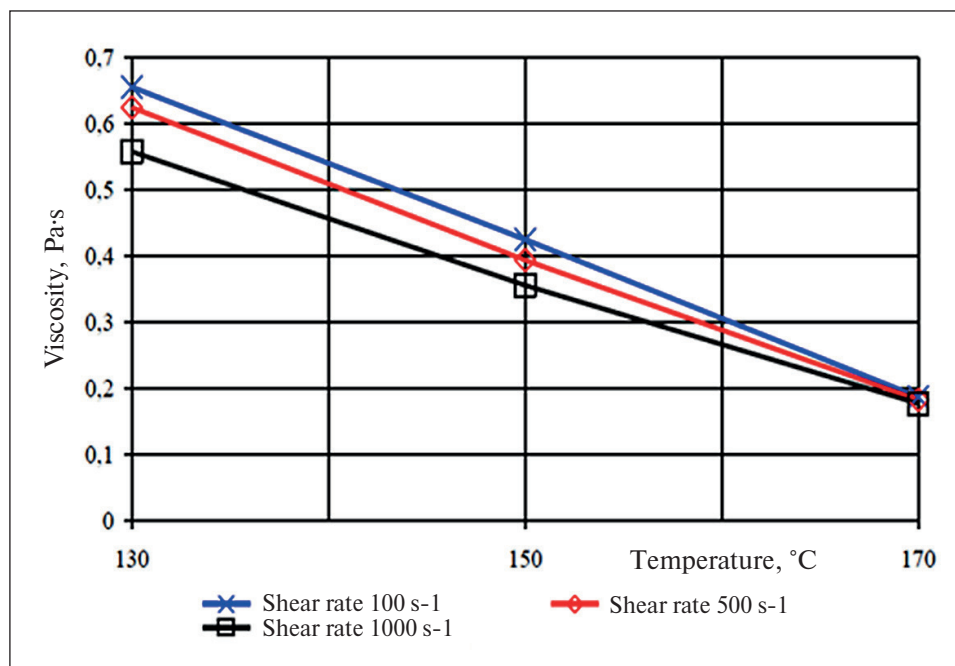
In the polydisperse system represented by the MP fraction (Fig. 6), the average equivalent diameter is determined as:

$$d_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{D_i}} = \frac{1}{\frac{0,018}{0,0035} + \frac{0,073}{0,0075} + \frac{0,237}{0,015} + \frac{0,489}{0,035} + \frac{0,184}{0,06}} = \frac{1}{47,35} = 0,021\text{mm} = 21\mu\text{m} \quad (2)$$

The maximum volume concentration of the filler with d_{eq} is determined (Fig. 8), using the dependence obtained in work [8], considering $\lg(21) = 1.32$. This equivalent diameter corresponds to a maximum volume concentration of the filler ~ 0.42 (Fig. 8), which, when converted to mass concentration, gives the bitumen : MP ratio = 43 : 57, assuming densities of bitumen and MP $\rho_b = 1.03 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{MP} = 2.7 \text{ g/cm}^3$.

Table 2. Results of the fractional composition analysis

Material	M_i , kg	k_i	D_i , mm	s_i , m ²	S_i , m ²	Share in total area, %	Specific surface area of the fraction, m ² /kg
Crushed stone fraction 5–15	41.7	0.354	13.5	2.4	8.5	0.25	0.2
		0.405	11	3.4			
		0.177	9	1.8			
		0.048	6.5	0.7			
		0.01	4	0.2			
Sand from crushing screenings	43.6	0.238	4.5	5.1	31.8	0.9	0.73
		0.437	3.5	12.1			
		0.257	2.5	10			
		0.044	1.5	2.8			
		0.017	0.9	1.8			
Fine natural sand	4.75	0.047	0.4	1.2	49	1.45	10.3
		0.365	0.27	14.2			
		0.373	0.22	18			
		0.148	0.16	9.7			
		0.045	0.115	4.1			
		0.016	0.1	1.7			
Mineral powder MP-1	4.75	0.184	0.06	32.3	557	86.2	117.3
		0.489	0.035	147.3			
		0.237	0.015	156.8			
		0.073	0.0075	166.6			
		0.018	0.0035	54.2			
Bitumen grade BND 60/90	5.2				646		

**Fig. 7.** Dependence of the dynamic viscosity of bitumen η on temperature at shear rates of 100, 500, 1000 s⁻¹

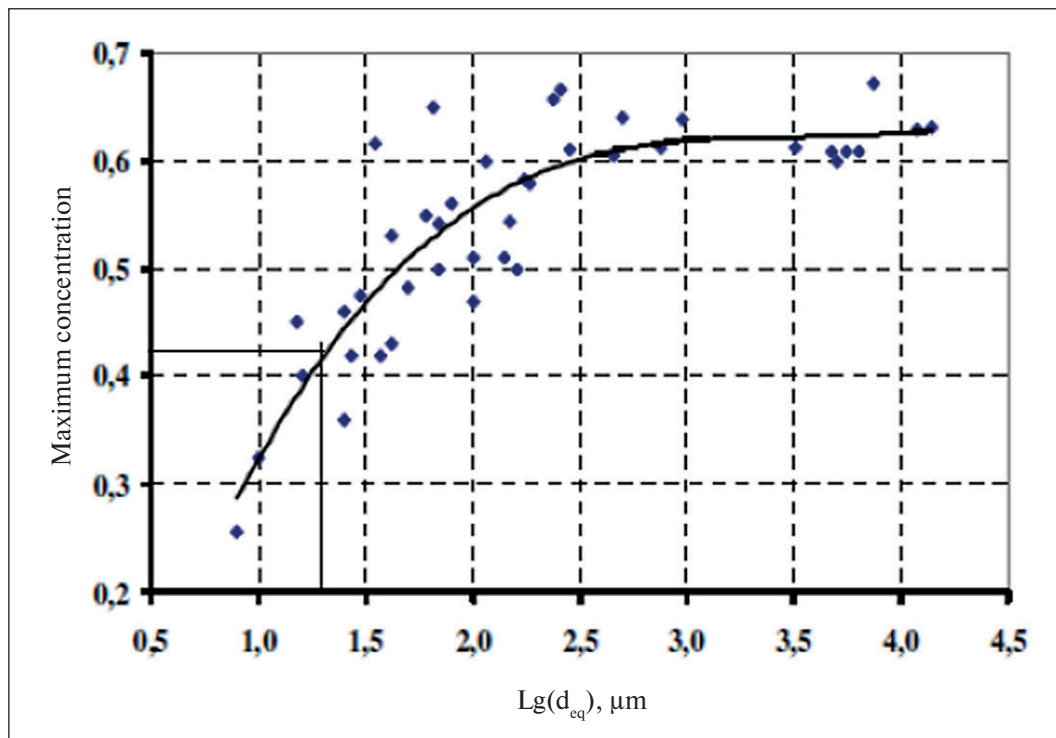


Fig. 8. Dependence of the maximum volume concentration of filler on particle diameter [8]

Equation (1) could be rewritten as:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(a \cdot K_{int}) = \eta_0 \cdot \exp(K_{int})^a, \quad (3)$$

$$\text{where } a = \frac{\Phi}{\Phi_{max} - \Phi}.$$

From (3) we obtain: $xp(K_{int}) = \sqrt[a]{\eta_{rel}}$, then

$$K_{int} = \ln(\exp(K_{int})) = \ln[\sqrt[a]{\eta_{rel}}]. \quad (4)$$

Based on the results of experiments with filled systems, equation (4) makes it possible to determine K_{int} – the coefficient accounting for the interaction of solid MP particles with bitumen and among themselves. A comparison of the experimental and calculated (according to Eq. 4)

values of the rheological characteristics of the “BND 60/90 bitumen – MP” system is displayed in Table 3 and in Figures 9 and 10.

Analysis of the obtained data proves that the interaction between bitumen and mineral powder follows certain regular patterns and depends on:

- the volumetric particle size distribution within the mineral powder fractions, which determines the interfacial surface area of interaction;
- the mixing temperature and the filling degree of the composition – optimal conditions: temperature from 160 °C to 170 °C, volume fraction 0.17–0.20.

Thus, the selected recipe of the asphalt concrete mixture, which was investigated in this study and contains a volume fraction of MP-1 at the level of 0.258, should be

Table 3. Viscosity of the disperse system “Bitumen – MP”

Filling degree, % (volume fraction)	T = 130 °C		T = 150 °C		T = 170 °C		η_{rel}		
	η , Pa·s	K_{int}	η , Pa·s	K_{int}	η , Pa·s	K_{int}	130 °C	150 °C	170 °C
0 (0)	0.66	0	0.42	0	0.18	0	1	1	1
5 (0.05)	0.78	1.23	0.5	1.29	0.22	1.47	1.18	1.19	1.22
10 (0.10)	1.18	1.9	0.72	1.73	0.34	2.05	1.8	1.71	1.89
15 (0.15)	2.25	2.2	1.31	2.03	0.98	3.01	3.4	3.12	5.4
20 (0.20)	5.56	2.34	3.56	2.35	2.8	3.01	8.42	8.48	15.55
25 (0.25)	12.46	2	7.9	2	6.25	2.4	18.88	18.81	34.7
30(0.3)	28.2	1.5	18.4	1.5	15.1	1.8	42.7	43.8	83.9

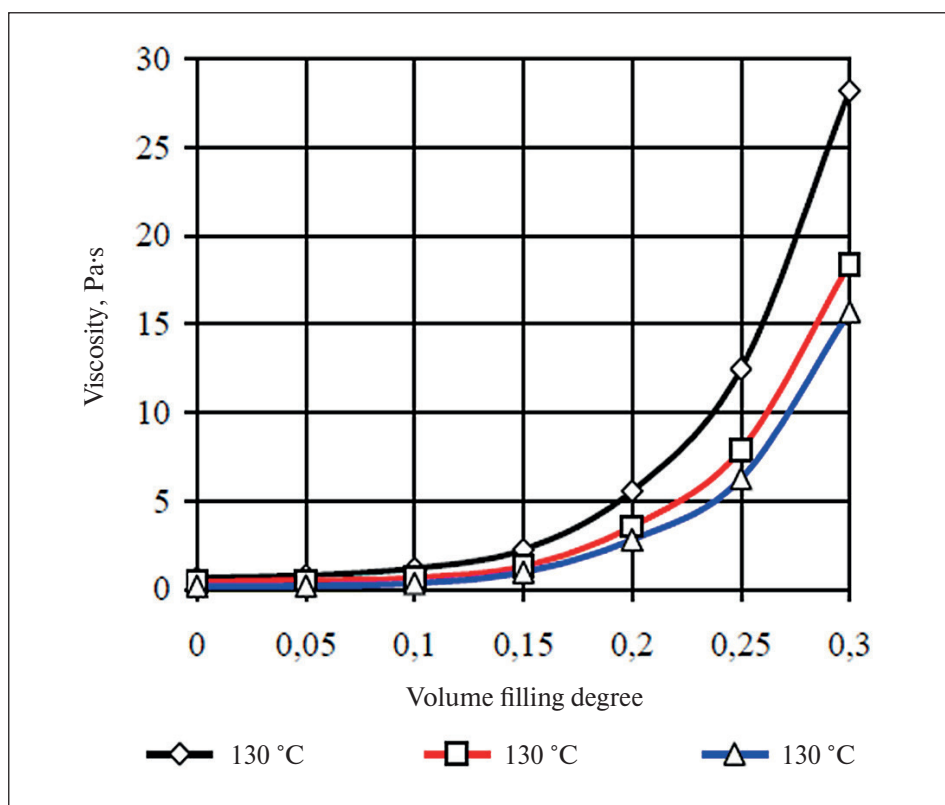


Fig. 9. Dependence of the viscosity of the "bitumen – MP" system on the filling degree

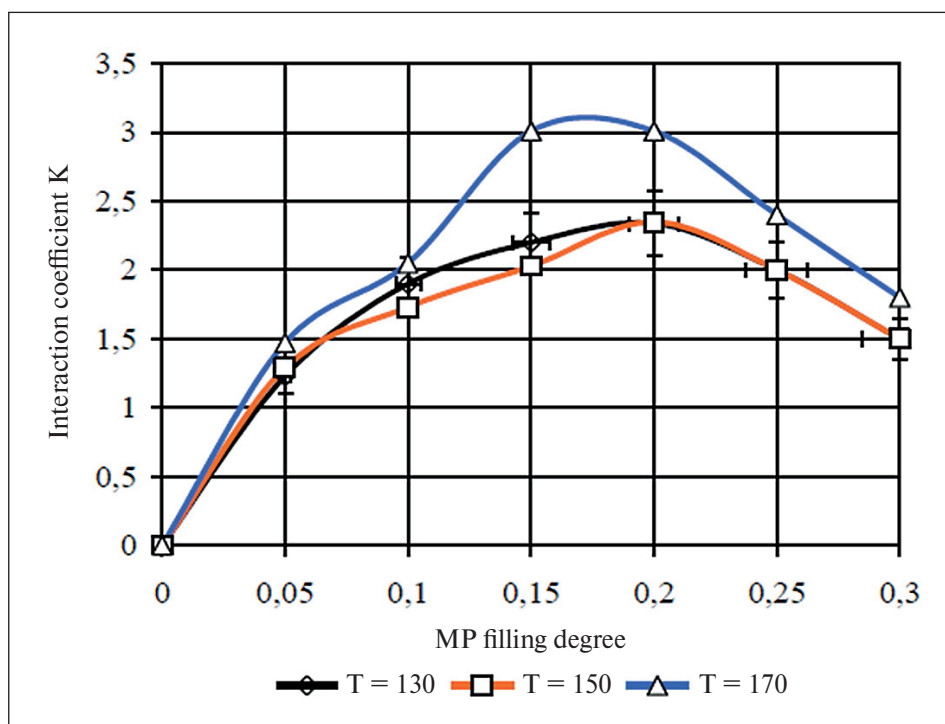


Fig. 10. Dependence of the interaction coefficient K_{int} on the filling degree and temperature of the "bitumen – MP" system

adjusted by increasing the bitumen mass by approximately 2.0 kg in order to reach the optimum interaction between the mineral powder and bitumen.

CONCLUSION

1. Based on optical studies of the standard asphalt concrete mixture fractional composition, the areas of interphase interaction between the stone filler and bitumen

were determined, which are consistent with the results of other researchers.

2. Based on the analysis of experimental and theoretical studies, the dependences of the interaction coefficient in the “bitumen – mineral powder” system on the dispersion composition, temperature, and filling degree were established.

3. The composition of the asphalt concrete mixture could be adjusted, using the obtained results, in order to improve its performance characteristics.

REFERENCES

- Gorelyshev N.V. *Asphalt concrete and other bituminous mineral materials*. Mzhaysk: Publishing TERRA; 1995.
- Obrazcova T.B. *Equivalent diameters of particles* URL: <https://sunspire.site/ru/articles/part7/> (accessed: 16.03.2026)
- Gorelyshev N.V. Interaction of bitumen and mineral powder in asphalt concrete. *Proceedings of MADI*. 1955;(10):20–23.
- Korolev I.V. Zolotarev V.A., Stupivtsev V.A. *Asphalt concrete pavements*. Donetsk: Donbass; 1970.
- Stolyarova N.A. *Compositions of the organic mineral mixtures for repair of coverages of nonrigid road clothes of highways*. Diss. candidate of technical sciences. Makeyevka; 2009.
- Sheets L.A. *Suspensions*. URL: <https://bigenc.ru/c/suspenzii-6dbfd0?ysclid=mmt39qo3c4877969100> (accessed: 16.03.2026)
- Ravichev L.V., Bepalov A.V., Loginov V.Ya. Mathematical simulation of the viscous properties of concentrated suspensions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2008;42(3):326-335. – EDN: ILAJDD.
- Ravichev L.V., Loginov V.Y., Bepalov A.V. Research of viscosity of suspensions of spherical particles. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2012;11:159-167. – EDN: PJBGSZ.
- Rawle A. *Basic principles of particle size analysis*. Technical Note, Malvern Instruments Limited; 2009. 12 p.
- Pabst W. *Characterization of particles and particle systems*. Prague. W. Pabst, E. Gregorova. ICT Prague; 2007.
- Inozemtsev S.S., Pozdnyakov M.K., Korolev E.V. Research of the adsorption-solvate layer of bitumen on the surface of mineral. *Vestnik MGSU*. 2012;11:159-167. – EDN: PJBGSZ.
- Bakhrakh G.S. On the estimation of the thickness of the adsorption-solvation layer of bitumens on the particle surface. *Colloid Journal*. 1969;39(1): 8-12.
- Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V. Highway Repair Using Fiber-Containing Asphalt Concrete Mixes with Dispersed Binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020;(4-5):62-67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>
- Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V., Vasiliev Yu.E. Uniform fiber distribution in cold asphalt mixtures with viscous microdispersed bitumen. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(1):17SATS120. <https://doi.org/10.15862/17SATS120>
- Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong. Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016;3(5):412-424. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.002>
- Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu. Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber–Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Materials*. 2018.11(11):2148. <https://doi.org/10.3390/ma11112148>
- Clara Celauro, Filippo Praticò. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018;170:245-253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>
- Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology. *Applied Sciences*. 2018;8(11):2191. <https://doi.org/10.3390/app8112191>
- Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li, Zhenghua Lv. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018;159:508-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>

20. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

21. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that no generative artificial intelligence technologies or artificial intelligence-based technologies were used in the preparation of this article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey Yu. Andronov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Academician of Transport, Deputy Head of the Saratov Regional Branch of the Russian Academy of Transport, 410015, Saratov, Barnaulskaya St., 2 “b”, bldg. 8, Russian Federation, atomic08@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1521-8110>

Yuri E. Vasiliev – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department “Road Construction Materials and Chemical Technologies”, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation, vashome@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1634-0152>

Andrey V. Kochetkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department “Bridges, Tunnels and Building Structures”, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation; Perm National Research Polytechnic University, 614000, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, Russian Federation, soni.81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6523-6095>

Pavel A. Slepnev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department “Urban Planning”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, slepnevpa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2237-4436>

Ilya A. Chizhikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department “Urban Planning”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, ilya2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2212-3501>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

S.Yu. Andronov – experimental research, theoretical model development, conclusion writing.

Yu.E. Vasiliev – supervision, theoretical model development, analysis of research results.

A.V. Kochetkov – theoretical model development, experimental data analysis, conclusion writing, scientific review and editing.

P.A. Slepnev – data curation, analysis of research results, writing – original draft.

I.A. Chizhikov – data curation, analysis of research results, writing – original draft.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 18.02.2026; approved after reviewing 25.03.2026; accepted for publication 05.04.2026.

Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок»

Сергей Юрьевич Андронов¹ , Юрий Эмануилович Васильев² , Андрей Викторович Кочетков^{2,3} , Павел Алексеевич Слепнев^{4*} , Илья Александрович Чижиков⁴ 

¹ Саратовское региональное отделение Российской академии транспорта, 410015, Саратов, ул. Барнаульская, 2 «б», к. 8, Российская Федерация

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Фракционный состав каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и режимы приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок» оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных смесей. Учитывая, что объем наполнителя асфальтобетонных смесей достигает 96% по массе или 87% по объему смеси, а объем связующего составляет до 4% по массе или до 13% по объему, в процессе приготовления асфальтобетонной смеси стремятся добиться ее однородности и обеспечить полное покрытие наполнителя связующим. Однако при недостатке связующего остаются пустоты, которые приводят к увеличению водопоглощения. **Материалы и методы.** На основании оптических исследований фракционного состава стандартной асфальтобетонной смеси определены площади межфазного взаимодействия между каменным наполнителем и битумом, согласующиеся с результатами других исследователей. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости коэффициента взаимодействия в системе «битум – минеральный порошок» от дисперсионного состава, температуры и степени наполнения. **Результаты и обсуждение.** Анализ полученных данных доказывает, что взаимодействие битума и минерального порошка подчиняется определенным закономерностям и зависит от объемного распределения по размерам частиц во фракциях минерального порошка, что определяет площадь межфазной поверхности взаимодействия; температуры смешения и степени наполнения композиции – оптимальные условия: температура от 160 °С до 170 °С, объемная доля 0,17–0,2. **Заключение.** Выбранную рецептуру асфальтобетонной смеси, которая исследовалась в работе и содержит объемную долю микропорошка на уровне 0,258, необходимо откорректировать в сторону увеличения массы битума до 2,0 кг с тем, чтобы попасть в оптимум по взаимодействию минерального порошка и битума. Полученные результаты позволяют скорректировать состав асфальтобетонной смеси с целью повышения ее эксплуатационных характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пористость каменных материалов, адгезия битума, адсорбция битума частицами, минеральный порошок, уплотненная асфальтобетонная смесь, моделирование структуры асфальтобетона

БЛАГОДАРНОСТИ: Статья посвящена светлой памяти нашего коллеги доктора технических наук, профессора Артеменко Александра Александровича, работавшего в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина. Авторы статьи выражают ему признательность за проведенные консультации при ее подготовке.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Кочетков А.В., Слепнев П.А., Чижиков И.А. Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок». *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system

Sergey Yu. Andronov¹ , Yuri E. Vasiliev² , Andrey V. Kochetkov^{2,3} , Pavel A. Slepnev⁴ , Ilya A. Chizhikov⁴ 

¹ Saratov Regional Branch of the Russian Academy of Transport, 410015, Saratov, Barnaulskaya St., 2 "b", bldg. 8, Russian Federation

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation

³ Perm National Research Polytechnic University, 614000, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, Russian Federation

⁴ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: slepnevpa@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The fractional composition of the stone filler in asphalt concrete mixtures and the preparation modes of the binder in the "bitumen – mineral powder" system have a significant impact on the performance characteristics of asphalt concrete mixtures. Considering that the filler volume of asphalt concrete mixtures reaches 96% by weight or 87% by volume of the mixture, and the binder volume is up to 4% by weight or up to 13% by volume. During the preparation of the asphalt concrete mixture, efforts are made to achieve its homogeneity and ensure complete coverage of the filler with binder. However, a lack of binder leaves voids, which lead to increased water absorption. **Materials and methods.** Based on optical studies of the fractional composition of a standard asphalt concrete mixture, the areas of interphase interaction between the stone filler and bitumen were determined, consistent with the results of other researchers. Based on the analysis of experimental and theoretical studies, the dependences of the interaction coefficient in the "bitumen – mineral powder" system on the dispersion composition, temperature, and filling degree were established. **Results and discussion.** Analysis of the obtained data proves that the interaction between bitumen and mineral powder follows certain patterns and depends on the volumetric particle size distribution within the mineral powder fractions, which determines the interfacial surface area of interaction. The optimal conditions for mixing temperature and composition filling are: temperature from 160 °C to 170 °C, volume fraction of 0.17–0.2. **Conclusion.** The selected asphalt concrete mixture formulation, which was studied in this study and contains a volume fraction of micropowder at the level of 0.258, must be adjusted upwards by increasing the bitumen mass to 2.0 kg in order to achieve the optimum interaction between mineral powder and bitumen. The obtained results allow for adjustments to the asphalt concrete mixture composition in order to improve its performance characteristics.

KEYWORDS: porosity of aggregates, bitumen adhesion, bitumen adsorption by particles, mineral powder, compacted asphalt concrete mixture, asphalt concrete structure modeling

ACKNOWLEDGMENTS: This article is dedicated to the memory of our colleague, Doctor of Engineering Sciences, Professor Alexander Alexandrovich Artemenko, who worked at the Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University. The authors express their gratitude to him for his consultations during its preparation.

FOR CITATION:

Andronov S.Yu., Vasiliev Yu.E., Kochetkov A.V., Slepnev P.A., Chizhikov I.A. Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

ВВЕДЕНИЕ

При создании асфальтобетонных смесей (АБС) основное внимание уделяется подбору гранулометрического состава каменного материала – наполнителя, обеспечивающего максимальное заполнение объема смеси. Это обеспечивает устойчивость дорожного покрытия к нагрузкам и деформациям, возникающим при эксплуатации дорожного покры-

тия. При этом объем наполнителя достигает 94–96% по массе или 85–87% по объему смеси. Дальнейшее уплотнение при повышенной температуре, когда связующее – битум – находится в жидкотекучем состоянии, позволяет получать покрытие, удовлетворяющее основным современным требованиям к дорожному покрытию. Однако анализ действующей нормативной документации и практические исследования показывают, что уложенному дорож-

ному покрытию присущи недостатки, которые проявляются в неблагоприятных условиях и приводят к его разрушению. В первую очередь это относится к такой нормируемой характеристике, как водопоглощение.

В перечне литературы [1–21] в целом отражен современный технический уровень разработки данной темы. В перечне [1–12] представлены одни из известных отечественных работ по направлению настоящей статьи. Собственные публикации авторов иллюстрируются работами [13, 14]. Зарубежные публикации представлены в перечне [14–21].

В процессе получения АБС стремятся обеспечить такое распределение вяжущего, чтобы битум покрывал сплошной пленкой все частицы каменного материала. Поэтому в случае недостаточного содержания битума не происходит полного покрытия каждой частицы пленкой битума, что способствует проникновению влаги через открытые места, отслаиванию битумной пленки и дальнейшему разрушению асфальтобетонного покрытия. С другой стороны, избыток битума приводит к его вытеснению из областей повышенного напряжения (при уплотнении) и созданию зон с меньшей плотностью распределения каменного материала, что ухудшает прочность и долговечность асфальтобетонного покрытия.

На первый взгляд, анализируя состав компонентов асфальтобетона, можно отметить, что связующее – битум – является гидрофобным материалом, и не может без специальной обработки поглощать воду. Другое дело – наполнители: щебень, песок, минеральный порошок. Эти каменные материалы имеют открытые поры на поверхности и способны впитывать воду. Технология приготовления смеси на асфальтобетонном заводе предусматривает, что при перемешивании при высокой температуре битум должен полностью покрывать поверхности частиц, адсорбироваться в поры и исключать попадание влаги извне в структуру смеси после ее укладки и уплотнения.

Следует отметить, что такая высокая степень наполнения при минимуме связующего требует провести оценку возможности создания непрерывной пленки на поверхности частиц наполнителя и проанализировать характеристики асфальтобетона в случае ее недостаточности. Кроме того, следует учитывать то обстоятельство, что битумная пленка, покрывающая частицы, неравномерно распределена по толщине из-за различного рельефа поверхностей частиц и в зависимости от их крупности и природы [1]. Из-за адсорбционного взаимодействия битума и минеральных частиц АБС эффективный объем наполнителя увеличивается. Толщина адсорбционного слоя на частицах размером от 3 до 10 мм изменяется в пределах 1,2–17 мкм.

Для того чтобы оценить толщину пленки при выбранной рецептуре АБС, необходимо определиться с площадью поверхности частиц разных форм и размеров, что при существующих методах исследований представляет серьезную проблему. Достаточно часто такие измерения проводятся путем анализа частиц по фотографиям, сделанным оптической микроскопией. Однако следует учитывать, что микроскопические снимки позволяют визуализировать только плоские проекции частиц, поэтому размеры частиц неправильной формы можно описать несколькими параметрами и характеристиками: максимальный или минимальный диаметр (линейный размер), максимальная длина, минимальная длина, объем, площадь поверхности и т.д. Как следствие, размеры, полученные разными методами, будут различаться. На рис. 1 показаны различные варианты ответов на вопрос, что есть размеры частицы, представленные в виде эквивалентных сфер. При этом ошибочных результатов нет – каждый ответ субъективно корректен: он отражает физически измеряемую характеристику [2, 9, 10].

Эта теория эквивалентной сферы. Измеряя некоторые характеристики частицы, предполагаем, что они относятся к сфере, рассчитываем универсальное число (диаметр этой сферы), которое характеризует нашу частицу. Этот пример наглядно подтверждает, что нет необходимости описывать размер частицы тремя или более числовыми значениями, которые, конечно, более точно выражают размер, но сложны и неудобны при составлении смесей. Представленная расчетная методика позволяет за короткое время смоделировать предположительно оптимальное распределение частиц по размерам, оперируя только соотношениями массовых долей исходных компонентов в смеси.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования частиц каменного материала АБС по методу эквивалентной сферы проводили после дисперсионного анализа каждой фракции асфальтобетона (щебень, отсев, песок, минеральный порошок). В качестве объекта исследований приняли стандартную АБС, состав которой представлен в табл. 1.

Поскольку масса каждой фракции в составе смеси строго дозируется, то, зная дисперсный состав и плотность материала (ρ), можно приблизительно оценить количество сфер с эквивалентной площадью поверхности, приходящихся на каждую размерную группу (n_i), и общую площадь их поверхности (s_i).

Суммируя площади каждой фракции, получим оценочную площадь поверхности частиц каменного материала в АБС определенной массы (S). При рас-

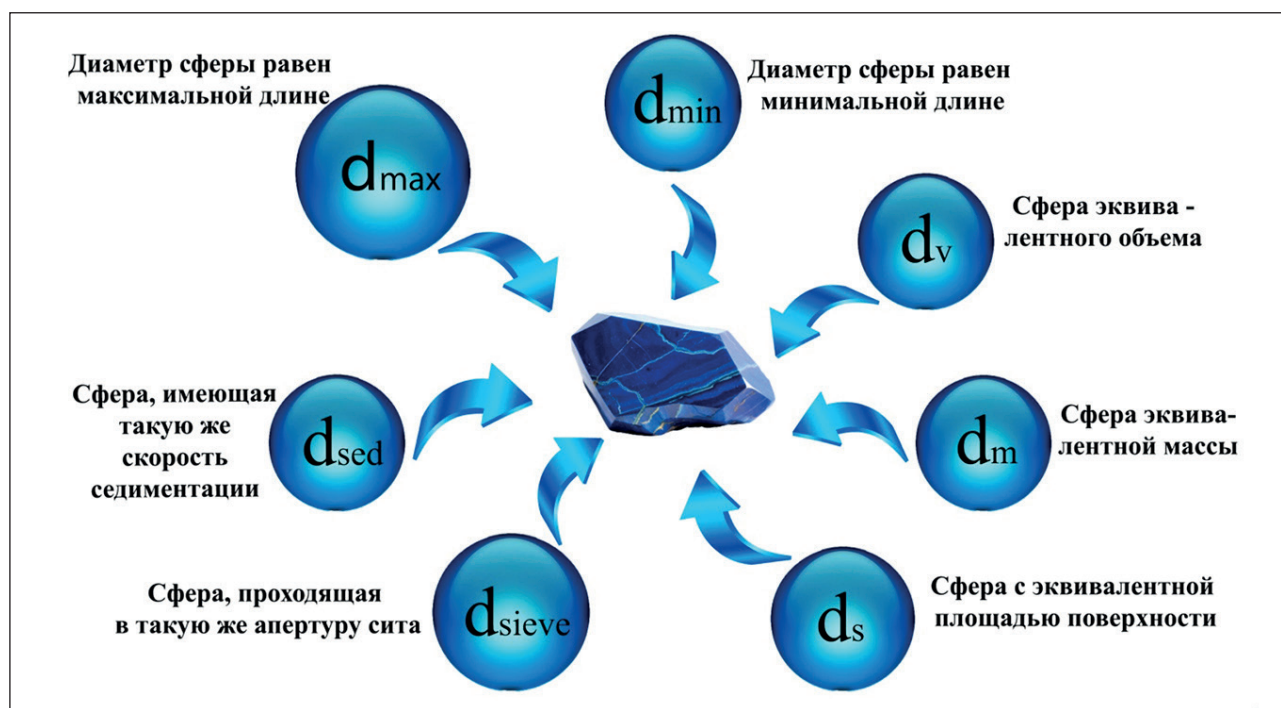


Рис. 1. Диаметры эквивалентных сфер [2]

Таблица 1. Состав асфальтобетонной смеси марки I тип Б

№	Материал	Содержание, %
1	Гранитный щебень фр. 5–15	41,7
2	Песок из отсевов дробления	43,7
3	Песок природный мелкий	4,7
4	Порошок минеральный МП-1	4,7
5	Битум марки БНД 60/90	5,2
Всего		100,0

четах использовали классические геометрические формулы:

$$\text{объем } i\text{-ой сферы: } V_i = \pi \cdot (D_i^3)/6$$

$$\text{масса } i\text{-ой сферы: } m_i = \rho \cdot V_i = \rho \cdot \pi \cdot (D_i^3)/6$$

$$\text{количество сфер каждой фракции: } n_i = k_i \cdot M_i / m_i,$$

где k_i , m_i – доля i -ой размерной группы и ее масса соответственно, M_i – масса фракции;

$$\text{площадь поверхности сферы: } s = \pi \cdot D^2$$

$$\text{площадь поверхности } i\text{-ой фракции:}$$

$$s_i = n_i \cdot \pi \cdot D_i^2 = k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 /$$

$$m_i = \frac{k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 \cdot 6}{\rho \cdot \pi \cdot D_i^3}.$$

При плотности каменного материала $\rho \sim 2700 \text{ кг/м}^3$ получаем:

$$S_i = \frac{6 \cdot 10^3}{2700} \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i} = 2,22 \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i};$$

площадь поверхностей всех фракций $S = \sum s_i$.

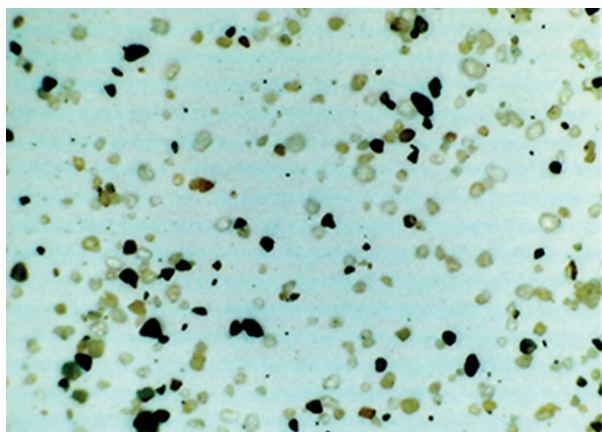
Изучение дисперсного состава каждой фракции АБС проводили по электронным снимкам, полученным с оптического микроскопа. Анализ снимков обрабатывали в программе «DG Analyzer 1.5», которая позволяет бинаризировать изображения, т.е. выставить порог светлых и темных участков на картинке и проанализировать полученный объект (рис. 2). Статистические результаты обработки изображений программа представляет в численном и графическом виде. Программа позволяет получить значения относительного количества белых пикселей, периметра и площади микроструктурных элементов, средних приведенных диаметров элементов, выявить ориентированность светлых участков.

Дисперсный состав АБС, состоящей из различных фракций каменного материала, представлен на рис. 3–6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты теоретической оценки площади поверхностей фракций АБС представлены в табл. 2. В качестве диаметров D_i на гистограммах выбирали среднее значение размерного диапазона по каждому долевого объему – например, в диапазоне 50–

Исходное изображение



Бинарное изображение

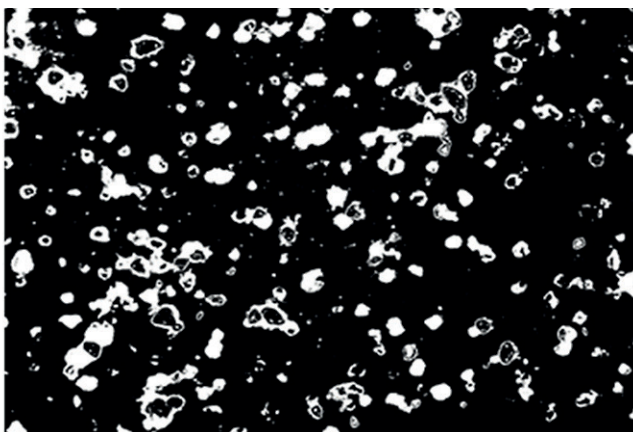


Рис. 2. Изображение «Песок» (увеличение в 25 раз)

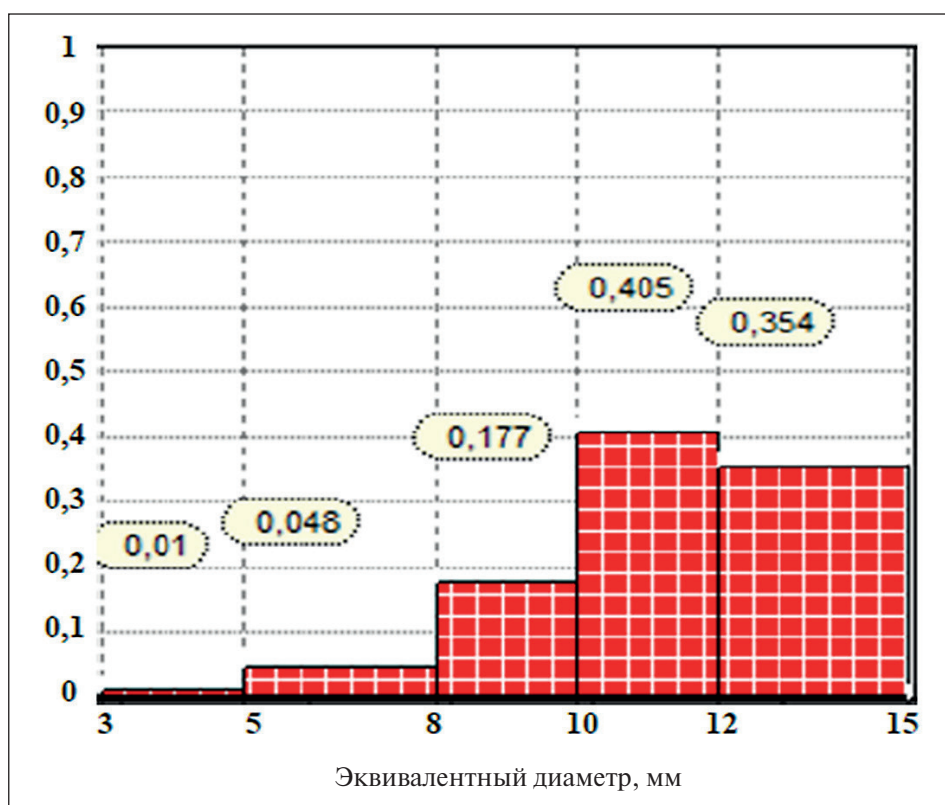


Рис. 3. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц щебня

70 мкм средний эквивалентный диаметр принимали $(50+70)/2 = 60$ мкм.

Полученные результаты расчетов согласуются с данными работ [4, 7, 8, 11, 12] о том, что формирование межфазной границы «битум – каменные частицы» в АБС осуществляется за счет МП.

Введение МП в битум повышает вязкость последнего и прочность покрытия, при этом по мере увеличения концентрации МП толщина пленки битума

между минеральными зёрнами уменьшается и вяжущее постепенно переходит в структурированное состояние [4].

В результате происходит уменьшение расстояния между частицами до уровня, когда свойства системы «битум – частицы» определяются энергией взаимодействия адсорбционно-сольватных слоев органического вяжущего на поверхности МП [4]. Кроме того, МП, полученный из мраморных и доломитовых

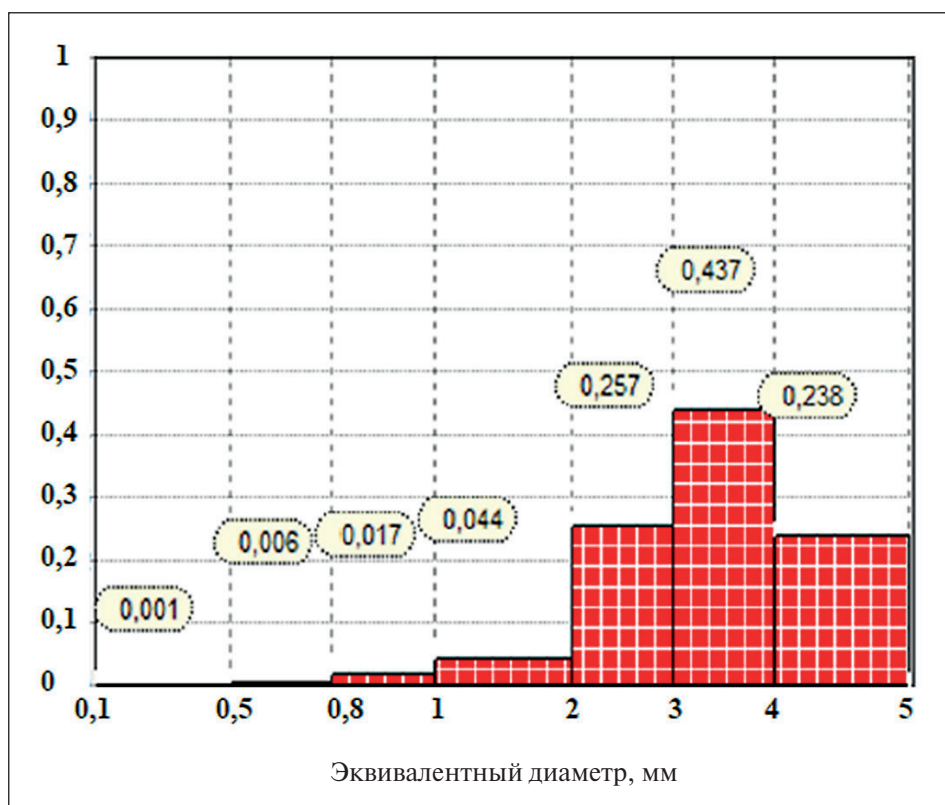


Рис. 4. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц отсева дробления

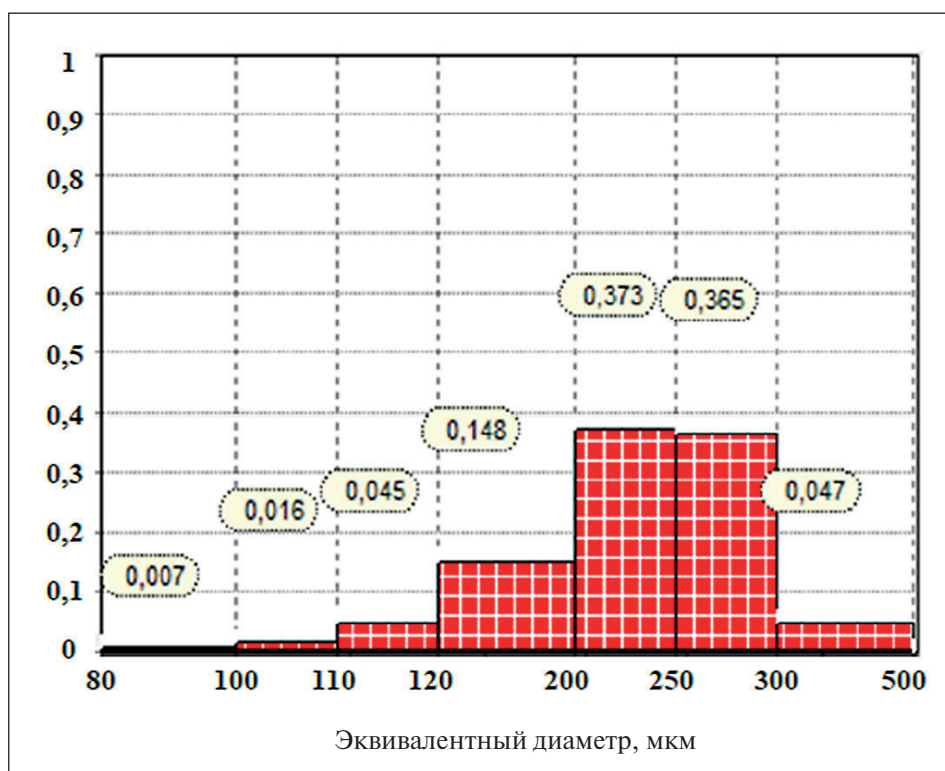


Рис. 5. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц песка

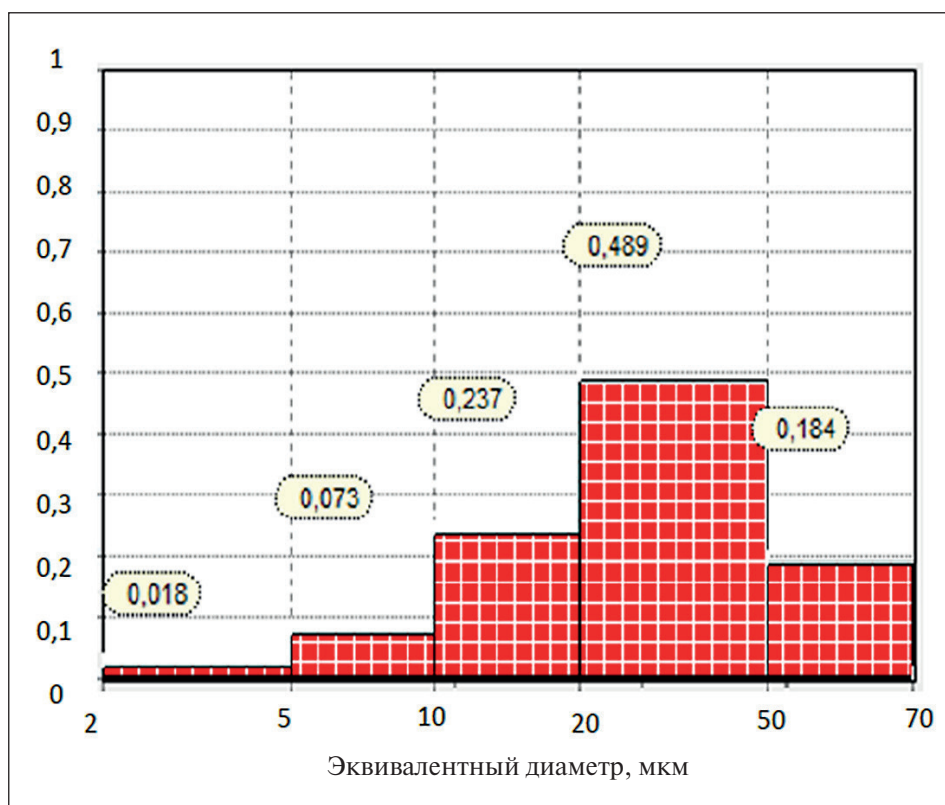


Рис. 6. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц МП-1

пород, обладает высоким положительным потенциалом с большим количеством адсорбционных центров в виде катионов Ca^{+2} и Mg^{+2} и способствует более интенсивному переводу битума в структурированное состояние с образованием хемоадсорбционных связей, которые позволяют прочно удерживать битумные пленки на поверхности, тем самым повышая прочность асфальто вяжущего [5].

Введение минерального порошка в битум при высокой температуре приводит к образованию суспензии полифракционного состава. Суспензия представляет собой смесь веществ, где твердое вещество распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном (неосевшем) состоянии [6]. Вязкость такой системы зависит от соотношения объемных концентраций частиц наполнителя (МП) и жидкой фазы, формы твердых частиц, их распределения по размерам, вязкости жидкой среды (битума) и характера взаимодействия твердой и жидкой фаз между собой.

Анализ механизмов, определяющих реологические характеристики суспензии МП в битуме, проводили на модели, представляющей частицы в виде сфер и на основе данных, полученных в результате дисперсионного анализа (рис. 6). Испытания суспензий проводили на ротационном вискозиметре

Rheotest RV2.1 при температурах 130–170 °С, соответствующих режимам смешения битума и МП.

Для расчета вязкости системы «битум – твердые сферические частицы» использовали уравнение Муни, показывающее хорошее соответствие с экспериментальными данными при расчетах концентрированных суспензий [8,9]:

$$\eta = \eta_{\text{cp}} \cdot \exp \left[\frac{K_{\text{вз}} \cdot \Phi}{\Phi_{\text{м}} - \Phi} \right], \quad (1)$$

где η – эффективная вязкость суспензии, Па·с;

η_{cp} – эффективная вязкость суспензионной среды, Па·с;

$K_{\text{вз}}$ – коэффициент, учитывающий взаимодействие твердых частиц с суспензионной средой и между собой;

$\Phi_{\text{м}}$ – максимальная объемная концентрация наполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

Φ – объемная концентрация наполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В полидисперсной системе, которую представляет фракция МП (рис.6), определим средний эквивалентный диаметр:

$$d_{\text{эkv}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{D_i}} = \frac{1}{\frac{0,018}{0,0035} + \frac{0,073}{0,0075} + \frac{0,237}{0,015} + \frac{0,489}{0,035} + \frac{0,184}{0,06}} = \frac{1}{47,35} = 0,021 \text{ мм} = 21 \text{ мкм}. \quad (2)$$

Таблица 2. Результаты анализа фракционного состава

Материал	M_i , кг	k_i	D_i , мм	s_i , м ²	S_i , м ²	Доля в суммарной пл., %	Удельная поверхность фракции, м ² /кг
Щебень фр. 5–15	41,7	0,354	13,5	2,4	8,5	0,25	0,2
		0,405	11	3,4			
		0,177	9	1,8			
		0,048	6,5	0,7			
		0,01	4	0,2			
Отсевы дробления	43,6	0,238	4,5	5,1	31,8	0,9	0,73
		0,437	3,5	12,1			
		0,257	2,5	10			
		0,044	1,5	2,8			
		0,017	0,9	1,8			
Песок	4,75	0,047	0,4	1,2	49	1,45	10,3
		0,365	0,27	14,2			
		0,373	0,22	18			
		0,148	0,16	9,7			
		0,045	0,115	4,1			
		0,016	0,1	1,7			
МП-1	4,75	0,184	0,06	32,3	557	86,2	117,3
		0,489	0,035	147,3			
		0,237	0,015	156,8			
		0,073	0,0075	166,6			
		0,018	0,0035	54,2			
Битум БНД 60/90	5,2				646		

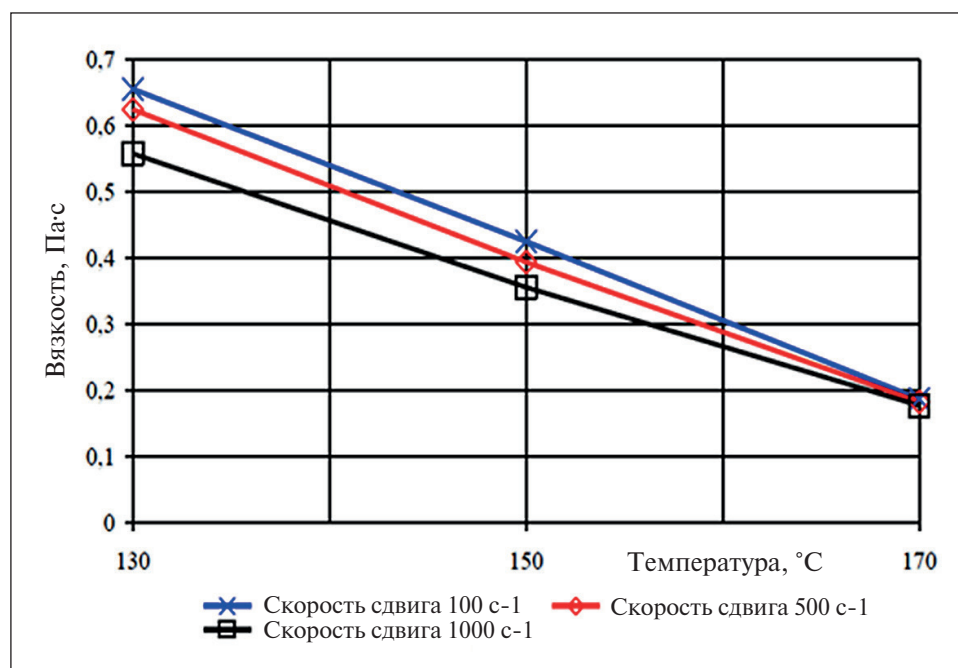


Рис. 7. Зависимость динамической вязкости битума η от температуры при скоростях сдвига 100, 500, 1000 с-1

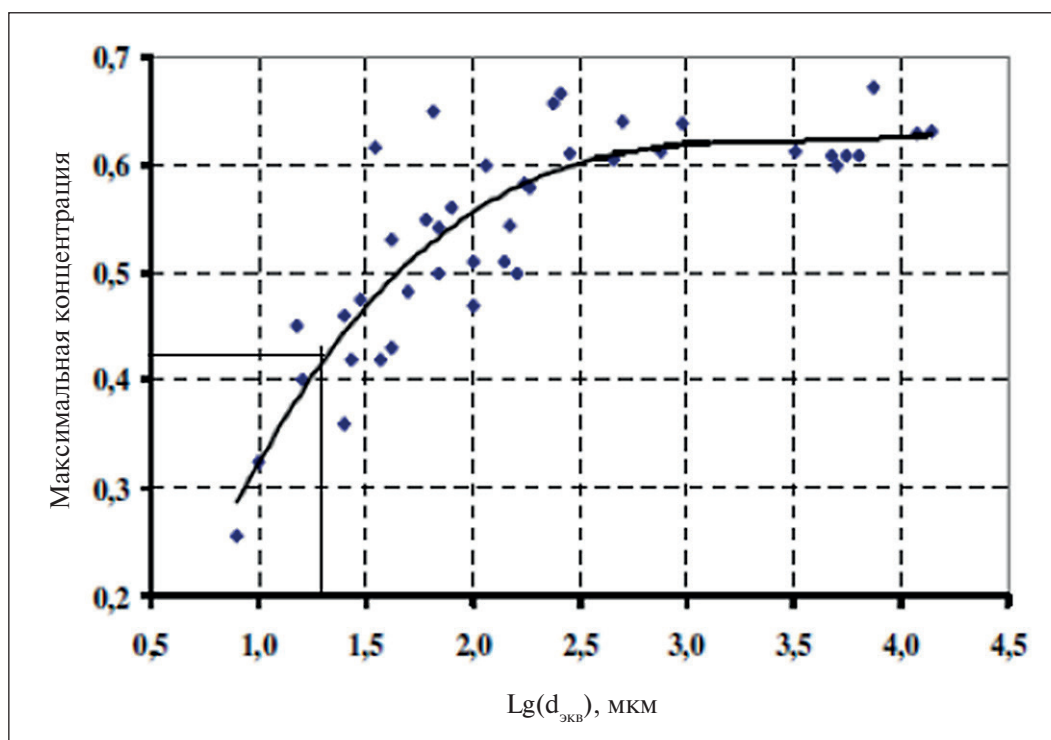


Рис. 8. Зависимость максимальной объемной концентрации наполнителя от диаметра частиц [8]

Используя зависимость, полученную в работе [8], определим максимальную объемную концентрацию наполнителя, имеющего $d_{экв}$ (рис. 8), учитывая, что $lg(21) = 1,32$. Этому эквивалентному диаметру соответствует максимальная объемная концентрация наполнителя $\sim 0,42$ (рис. 8), что в пересчете на массовую концентрацию соответствует соотношению битум : МП = 43 : 57, принимая плотность битума и МП $\rho_b = 1,03 \text{ г/см}^3$, $\rho_{МП} = 2,7 \text{ г/см}^3$.

Уравнение (1) перепишем в виде:

$$\eta = \eta_c \cdot \exp(a \cdot K_{вз}) = \eta_c \cdot \exp(K_{вз})^a, \quad (3)$$

$$\text{где } a = \frac{\Phi}{\Phi_M - \Phi}.$$

Из (3) получаем: $\exp(K_{вз}) = \sqrt[a]{\eta_{отн}}$, тогда

$$K_{вз} = \ln(\exp(K_{вз})) = \ln[\sqrt[a]{\eta_{отн}}]. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет по результатам экспериментов с наполненными системами определить $K_{вз}$ – коэффициент, учитывающий взаимодействие твердых частиц МП с битумом и между собой. Сравнение экспериментальных и расчетных (4) значений реологических характеристик системы «битум БНД 60/90 – МП» приведены в таблице 3 и на рисунках 9, 10.

Анализ полученных данных доказывает, что взаимодействие битума и минерального порошка

Таблица 3. Вязкость дисперсной системы «Битум – МП»

Степень наполнения, % (объемная доля)	T = 130 °C		T = 150 °C		T = 170 °C		$\eta_{отн}$		
	η , Па·с	$K_{вз}$	η , Па·с	$K_{вз}$	η , Па·с	$K_{вз}$	130 °C	150 °C	170 °C
0 (0)	0,66	0	0,42	0	0,18	0	1	1	1
5 (0,05)	0,78	1,23	0,5	1,29	0,22	1,47	1,18	1,19	1,22
10 (0,10)	1,18	1,9	0,72	1,73	0,34	2,05	1,8	1,71	1,89
15 (0,15)	2,25	2,2	1,31	2,03	0,98	3,01	3,4	3,12	5,4
20 (0,20)	5,56	2,34	3,56	2,35	2,8	3,01	8,42	8,48	15,55
25 (0,25)	12,46	2	7,9	2	6,25	2,4	18,88	18,81	34,7
30(0,3)	28,2	1,5	18,4	1,5	15,1	1,8	42,7	43,8	83,9

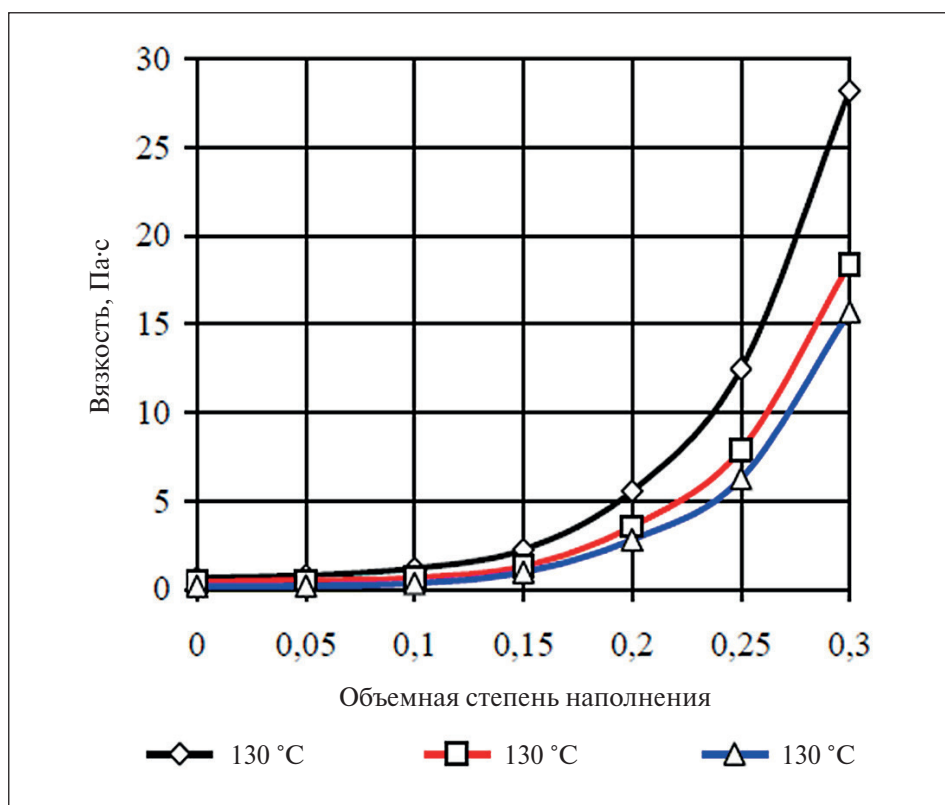


Рис. 9. Зависимость вязкости системы «битум – МП» от степени наполнения

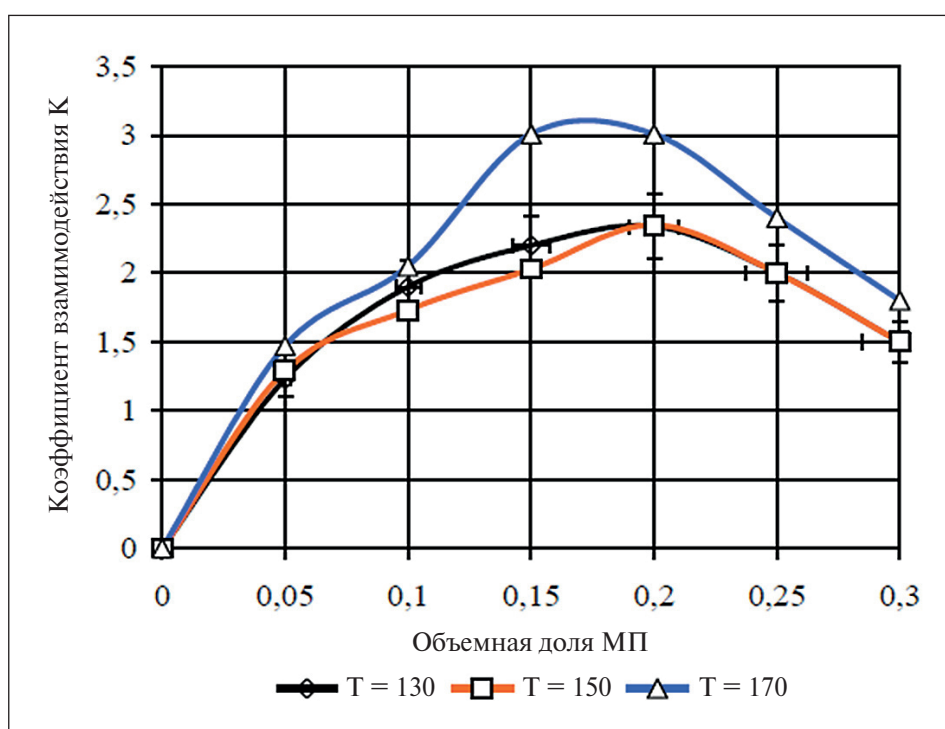


Рис. 10. Зависимость коэффициента $K_{вз}$ от степени наполнения и температуры системы «битум – МП»

подчиняется определенным закономерностям и зависит от:

- объемного распределения по размерам частиц во фракциях минерального порошка, что определяет площадь межфазной поверхности взаимодействия;
- температуры смещения и степени наполнения композиции – оптимальные условия: температура от 160 °С до 170 °С, объемная доля 0,17–0,2.

Таким образом, выбранную рецептуру АБС, которая исследовалась в работе и содержит объемную долю МП-1 на уровне 0,258, необходимо откорректировать в сторону увеличения массы битума на ~ 2,0 кг, с тем, чтобы попасть в оптимум по взаимодействию минерального порошка и битума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании оптических исследований фракционного состава стандартной асфальтобетонной смеси определены площади межфазного взаимодействия между каменным наполнителем и битумом, согласующиеся с результатами других исследователей.

2. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости коэффициента взаимодействия в системе «битум – минеральный порошок» от дисперсионного состава, температуры и степени наполнения.

3. Полученные результаты позволяют скорректировать состав асфальтобетонной смеси с целью повышения ее эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горельшев Н.В. *Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы*. Можайск: Издательство ТЕРРА; 1995. 176 с.
2. Образцова Т.Б. Эквивалентные диаметры частиц URL: <https://sunspire.site/ru/articles/part7/> (дата обращения: 16.03.2026)
3. Горельшев Н. В. Взаимодействие битума и минерального порошка в асфальтовом бетоне. *Труды МАДИ*. 1955;(10):20–23.
4. Королев И.В., Золотарев В.А., Ступивцев В.А. *Асфальтобетонные покрытия*. Донецк: Донбасс, 1970. 162 с.
5. Столярова Н.А. *Литые органоминеральные смеси для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа*. Дис. канд. тех. наук. Макеевка; 2009. 167 с
6. Шиц Л.А. Суспензии. URL: <https://bigenc.ru/c/suspenzii-6dbfd0?ysclid=mmt39qo3c4877969100> (дата обращения: 16.03.2026)
7. Равичев Л.В., Беспалов А.В., Логинов В.Я. Моделирование вязкостных свойств концентрированных суспензий. *Теоретические основы химической технологии*. 2008;42(3):326-335. – EDN: ILAJDD
8. Равичев Л.В., Логинов В.Я., Беспалов А.В. Исследование вязкости суспензий сферических частиц. *Вестник СГТУ*. 2012;1(64). Выпуск 2:26-30. – EDN: PWBRDV
9. Роул А. *Основные принципы анализа размеров частиц*. Техническая аннотация, Malvern Instruments Limited; 2009. 12 с.
10. Pabst W. *Characterization of particles and particle systems*. Prague. W. Pabst, E. Gregorova. ICT Prague; 2007.
11. Иноземцев С.С., Поздняков М.К., Королев Е.В. Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка. *Вестник МГСУ*. 2012;11:159-167. – EDN: PJBGSZ
12. Бахрах Г.С. К оценке толщины адсорбционно-сольватного слоя битумов на поверхности частиц. *Коллоидный журнал*. 1969;39(1):8-12.
13. Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V. Highway Repair Using Fiber-Containing Asphalt Concrete Mixes with Dispersed Binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020;(4-5):62-67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>
14. Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V., Vasiliev Yu.E. Uniform fiber distribution in cold asphalt mixtures with viscous microdispersed bitumen. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(1):17SATS120. <https://doi.org/10.15862/17SATS120>
15. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong. Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016;3(5):412-424. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.002>
16. Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu. Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles. *Materials*. 2018.11(11):2148. <https://doi.org/10.3390/ma11112148>

17. Clara Celauro, Filippo Praticò. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018;170:245–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>

18. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology. *Applied Sciences*. 2018;8(11):2191. <https://doi.org/10.3390/app8112191>

19. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li, Zhenghua Lv Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018;159:508–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>

20. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

21. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

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

Андронов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, академик транспорта, заместитель руководителя Саратовское областное отделение Российской академии транспорта, 410015, Саратов, ул. Барнаульская, 26, к. 8, Российская Федерация, atomic08@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1521-8110>

Васильев Юрий Эмануилович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, vashome@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1634-0152>

Кочетков Андрей Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Российская Федерация, soni.81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6523-6095>

Слепнев Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, slepnevpa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2237-4436>

Чижиков Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, ilya2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2212-3501>

ВКЛАД АВТОРОВ

Андронов С. Ю. – проведение экспериментальных исследований, разработка теоретической модели, составление заключения.

Васильев Ю. Э. – научное руководство, разработка теоретической модели, анализ результатов исследований.

Кочетков А. В. – разработка теоретической модели, обработка экспериментальных данных, составление заключения, научное редактирование текста статьи.

Слепнев П. А. – сбор и обработка экспериментальных данных, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Чижиков И. А. – сбор и обработка экспериментальных данных, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.02.2026; одобрена после рецензирования 25.03.2026; принята к публикации 05.04.2026.

Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers

Akymbek Abdykalykov¹ , Zhanbolot K. Aidaraliev^{1*} , Zhympargul Abdykalyk kyzy² ,
Nematilla A. Sopubekov³ , Akzhol Suiunbek uulu² 

¹ Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aitmatov Avenue 66, Building № 1, Room: 1/432, Kyrgyzstan

² Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Chuy Avenue 265a, Kyrgyzstan

³ Osh Technological University, Osh, 723503, Isanova Street 81, Kyrgyzstan

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

ABSTRACT

Introduction. One of the most promising materials for dispersed reinforcement of concrete is basalt fiber. It is characterized by high strength, thermal and chemical resistance, as well as environmental safety. The use of reinforcing fibers significantly increases the flexural and tensile strength of concrete and improves its water resistance and resistance to dynamic loads. A number of studies show that the introduction of basalt fiber contributes to an increase in the compressive and flexural strength of composites, as well as their crack resistance. With an optimal fiber content, a spatial reinforcing framework is formed, which increases the energy capacity of material fracture and its resistance to external influences. **Methods and materials.** Fiber-reinforced concretes were produced using the following technology: marble fillers of different fractions, reinforcing fibers, and Portland cement were first mixed in a dry state for 10 minutes, after which the required amount of water was added. The resulting mixture was stirred for 30 minutes and molded into special forms for physical and technical studies. After 24 hours, the samples were treated with water steam for 30 minutes, after which, after three days, tests for density, water absorption, and strength were carried out. According to the experimental plan of the H₅ type, 27 compositions of fiber-reinforced concrete were obtained. Based on the experimental results, regression coefficients of models describing the studied properties of fiber-reinforced concrete with marble fillers were determined using the least squares method. Graphical representations of the experimental–statistical models were also constructed in the form of two-dimensional nomograms. **Results.** It was established that combined reinforcement with basalt fibers (BF) and polypropylene fibers (PF) is possible but requires optimization of their ratio. The most effective scheme is when the main reinforcing role belongs to basalt fibers (2–3%), while polypropylene fibers are introduced in small amounts (up to 1–2%) to control crack formation. The analysis of graphical regions and derivative functions showed the following optimal range of component contents: marble chips – 25–30%, marble powder – 10–15%, marble dust – about 12%, basalt fibers – 2–4%, polypropylene fibers – 0–2%. **Conclusion.** Basalt fibers are an effective means of increasing the strength characteristics of fiber-reinforced concrete at moderate content (about 2–3%). However, their excessive amount leads to a decrease in density and an increase in water absorption of the material. Polypropylene fibers in most cases reduce density and compressive strength and increase water absorption; therefore, their use should be limited to small doses and mainly applied to improve crack resistance. The best complex of physical and mechanical properties is achieved when marble dust is used in combination with basalt fiber.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, basalt fiber, basalt fibers, polypropylene fibers, experimental-statistical modeling, strength of fiber-reinforced concrete, nomograms

ACKNOWLEDGMENTS: This research was carried out with the support of the Ministry of Science, Higher Education and Innovation of the Kyrgyz Republic. Registration No. 240032, 15.02.2024.

FOR CITATION:

Abdykalykov A., Aidaraliev Z.K., Abdykalyk kyzy Zh., Sopubekov N.A., Suiunbek uulu A. Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей

Акымбек Абдыкалыков¹ , Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев^{1*} , Жыпаргуль Абдыкалык кызы² ,
Нематилла Абдилахатович Сопубеков³ , Акжол Суйунбек уулу² 

¹ Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, корпус № 1, ауд.: 1/432, Кыргызстан

² Институт физики имени Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызстан

³ Ошский технологический университет, Ош, 723503, ул. Исанова 81, Кыргызстан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из наиболее перспективных материалов для дисперсного армирования бетонов является базальтовое волокно. Оно характеризуется высокой прочностью, термической и химической стойкостью, а также экологической безопасностью. Применение армирующих фибр позволяет значительно повысить прочность бетона при изгибе и растяжении, а также улучшить его водостойкость и устойчивость к динамическим нагрузкам. Ряд исследований показывает, что введение базальтовой фибры способствует повышению прочности композитов на сжатие и изгиб, а также увеличению их трещиностойкости. При оптимальном содержании волокон формируется пространственный армирующий каркас, который повышает энергоёмкость разрушения материала и его устойчивость к внешним воздействиям. **Методы и материалы.** С целью определения оптимального состава фибробетона был проведён пятифакторный эксперимент по плану Na_5 . Были выбраны следующие компоненты рецептурного состава: мраморная крошка (МК), мраморный порошок (МП), мраморная пыль (М-пыль), базальтовые фибры (ФБ), полипропиленовые фибры (ФП), а также связующее – портландцемент. Фибробетоны изготавливались по следующей технологии: мраморные наполнители различных фракций, армирующие фибры и портландцемент предварительно перемешивались в сухом состоянии в течение 10 минут, после чего добавлялось необходимое количество воды. Полученная смесь перемешивалась в течение 30 минут и формовалась в специальные формы для проведения физико-технических исследований. Через 24 часа образцы подвергались обработке водяным паром в течение 30 минут, после чего через трое суток проводились испытания на плотность, водопоглощение и прочность. В соответствии с планом эксперимента типа Na_5 было получено 27 составов фибробетона. По результатам эксперимента методом наименьших квадратов были определены коэффициенты регрессии моделей исследуемых свойств фибробетона с мраморными наполнителями. Также были построены графические образы экспериментально-статистических моделей в виде двумерных номограмм. **Результаты.** Установлено, что комбинированное армирование базальтовыми (ФБ) и полипропиленовыми (ФП) фибрами возможно, однако требует оптимизации их соотношения. Наиболее эффективной является схема, при которой основная армирующая роль принадлежит базальтовым фибрам (2–3%), тогда как полипропиленовые фибры вводятся в небольших количествах (до 1–2%) для контроля трещинообразования. Анализ графических областей и производных функций показал следующий оптимальный диапазон содержания компонентов: мраморная крошка – 25–30%, мраморный порошок – 10–15%, мраморная пыль – около 12%, базальтовые фибры – 2–4%, полипропиленовые фибры – 0–2%. **Заключение.** Базальтовые фибры являются эффективным средством повышения прочностных характеристик фибробетона при умеренном содержании (около 2–3%). Однако их избыточное количество приводит к снижению плотности и увеличению водопоглощения материала. Полипропиленовые фибры в большинстве случаев снижают плотность и прочность на сжатие и увеличивают водопоглощение, поэтому их применение целесообразно ограничивать малыми дозами и использовать преимущественно для повышения трещиностойкости. Наилучший комплекс физико-механических свойств достигается при использовании мраморной пыли в сочетании с базальтовой фиброй.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, базальтовое волокно, фибры базальтовые, фибры полипропиленовые, экспериментально-статическое моделирование, прочность фибробетона, номограммы

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная научная работа выполнена при поддержке Министерства науки, высшего образования и инноваций Кыргызской Республики. Проект имеет регистрационный номер № 240032 от 15.02.2024 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Сопубеков Н.А., Суйунбек уулу А. Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

INTRODUCTION

In modern construction, reinforced concrete materials are widely used to overcome the shortcomings of conventional concrete, including low tensile strength, poor impact resistance, and a tendency to form shrinkage cracks. Traditionally, the strength characteristics of concrete are improved by incorporating steel reinforcement or metal meshes. In recent years, the technology of dispersed reinforcement of concrete matrices using various fibers, including steel, glass, basalt, and polymer fibers, has been actively developing [1–7].

Dispersed reinforcement contributes to increasing crack resistance, plasticity, and durability of concrete, as well as reducing the weight of structures. Unlike traditional reinforcement with metal mesh, fiber reinforcement prevents crack formation at early stages of concrete hardening when the material is in a plastic state [8–11].

Polymer fibers, particularly polypropylene fibers, are widely used due to their corrosion resistance and manufacturability [12–15]. However, their use is limited by relatively low adhesion to the cement matrix and a reduction in strength characteristics during long-term operation. Metal fibers possess high strength but are susceptible to corrosion and may exhibit a cathodic effect in aggressive environments of cement solutions.

Glass fiber is also used for reinforcing cement composites; however, its durability largely depends on the alkaline environment of the cement stone. It has been established that hydration products of Portland cement may negatively affect glass fiber, while the use of alumina cements can increase its chemical resistance [16].

Studies show that the use of basalt and polymer fibers significantly improves frost resistance, impact toughness, and crack resistance of fiber-reinforced concretes. In addition, the use of dispersed reinforcement contributes to the uniform distribution of stresses in the concrete matrix and increases the durability of structures [16–19]. The combined use of various mineral fillers and fibers contributes to improving the physical, mechanical, and operational properties of fiber-reinforced concretes [20–25].

Fiber-reinforced concretes are widely used in industrial and civil construction, transport infrastructure, and hydraulic engineering structures. Their application increases the resistance of structures to dynamic loads, temperature effects, and aggressive environments. However, the higher cost of fiber-reinforced concretes compared with conventional concretes remains one of the factors limiting their widespread use [26–35].

Thus, the analysis of literature sources shows that dispersed reinforcement of concrete with various types of fibers is an effective way to improve its strength and performance characteristics. Among different types of reinforcing fibers, basalt fiber is of particular interest due to its high strength, chemical resistance, and promising

prospects for wide application in construction composite materials.

The aim of this study is to optimize the formulation factors and properties of a cement-based composite material using marble aggregates and dispersed fiber reinforcement.

METHODS AND MATERIALS

During the experimental work, a five-factor experiment was carried out according to the H_a5 design plan (Table 2), in which five formulation factors were varied: X_1 – marble chips (MC), %; X_2 – marble powder (MP), %; X_3 – marble dust (MD), %; X_4 – basalt fibers (BF), %; X_5 – polypropylene fibers (PF), %; the remaining component was Portland cement. The variation levels of the five factors are presented in Table 1.

The following indicators were selected as quality parameters of the composite material: Y_1 – compressive strength (R(c)), MPa; Y_2 – tensile strength, %; Y_3 – water absorption; Y_4 – density, kg/m^3 .

Based on the experimental results, the regression coefficients of the models describing the selected properties of the composite material (1–6) were calculated using the least squares method. Graphical representations of the experimental–statistical (ES) models were also constructed in the form of two-dimensional nomograms (Figs. 1–8).

The experimental samples were prepared using the following technology: marble fillers of different fractions, reinforcing fibers, and Portland cement were first mixed in a dry state for 10 minutes, after which the required amount of water was added. The resulting mixture was then mixed for 30 minutes and molded into special molds for testing. After 24 hours, the composite samples were treated with water steam for 30 minutes. After three days of curing, the samples were tested for density, water absorption, and strength.

RESULTS

Model Y_1 (Density, kg/m^3)

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (density, } \text{kg/m}^3\text{)} &= 1637.03 - 28.67 \cdot X_1 + \\
 &+ 32.0 \cdot X_2 + 73.8 \cdot X_3 - 75.5 \cdot X_4 - 68.39 \cdot X_5 + \\
 &+ 102.09 \cdot X_1^2 + 3.09 \cdot X_2^2 - 0.91 \cdot X_3^2 - \\
 &- 154.91 \cdot X_4^2 - 86.41 \cdot X_5^2 + 70.07 \cdot X_1 X_2 + \\
 &+ 35.44 \cdot X_1 X_3 + 30.19 \cdot X_1 X_4 + 32.06 \cdot X_1 X_5 - \\
 &- 38.07 \cdot X_2 X_3 - 29.06 \cdot X_2 X_4 - 30.94 \cdot X_2 X_5 - \\
 &- 120.94 \cdot X_3 X_4 - 55.31 \cdot X_3 X_5 - 44.32 \cdot X_4 X_5, \quad (1)
 \end{aligned}$$

Factor Influence Analysis. Based on the regression coefficients and numerical calculations, it was found that an increase in density is promoted by increasing marble dust (X_3) – the most significant factor; decreasing basalt (X_4) and polypropylene fibers (X_5); the interaction $X_1 X_2$

Table 1. Levels of factor variation

Factor levels	X ₁ MC, % (marble chips)	X ₂ MP, % (marble powder)	X ₃ MD, % (marble dust)	X ₄ BF, % (basalt fibers)	X ₅ PF, % (polypropylene fibers)
-1	20	5	4	0	0
0	25	10	8	2	2
1	30	15	12	4	4

Note: MC – marble chips; MP – marble powder; MD – marble dust; BF – basalt fibers; PF – polypropylene fibers.

Table 2. H₅-type experimental design

No.	Normalized variables					Natural variables					Properties	
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	X ₁ -MC, %	X ₂ -MP, %	X ₃ -M-dust, %	X ₄ -BF, %	X ₅ -PF, %	Y ₁ -density, kg/m ³	Y ₂ -Water absorption, %
1	+	+	+	+	+	30	15	12	4	4	1270	27
2	-	-	+	+	+	20	5	12	4	4	1271	25.2
3	-	+	-	-	-	20	15	4	0	0	1544	17.4
4	+	-	-	-	-	30	5	4	4	4	1280	22.3
5	-	+	-	+	+	20	15	4	4	4	1330	14.7
6	+	-	-	+	+	30	5	4	4	4	1350	12.6
7	+	+	+	-	-	30	15	12	0	0	1940	9.3
8	-	-	+	-	-	20	5	12	0	0	1950	14.2
9	-	+	+	+	-	20	15	12	4	0	1480	15.4
10	+	-	+	+	-	30	5	12	4	0	1490	12
11	+	+	-	-	+	30	15	4	0	4	1470	20.4
12	-	-	-	-	+	20	5	4	0	4	1465	8
13	-	+	+	-	+	20	15	12	0	4	1615	9
14	+	-	+	-	+	30	5	12	0	4	1640	10,3
15	+	+	-	+	-	30	15	4	4	0	1590	10.5
16	-	-	-	+	-	20	5	4	4	0	1585	11.3
17	+	0	0	0	0	30	10	8	2	2	1760	11
18	-	0	0	0	0	20	10	8	2	2	1757	9.2
19	0	+	0	0	0	25	15	8	2	2	1689	12
20	0	-	0	0	0	25	5	8	2	2	1630	12.7
21	0	0	+	0	0	25	10	12	2	2	1645	13
22	0	0	-	0	0	25	10	4	2	2	1666	12
23	0	0	0	+	0	25	10	8	4	2	1488	11
24	0	0	0	-	0	25	10	8	0	2	1515	12
25	0	0	0	0	+	25	10	8	2	4	1576	12.7
26	0	0	0	0	0	25	10	8	2	2	1482	13.6
27	0	0	0	0	0	25	10	8	2	0	1564	12.7

Table 3. H_a5-type experimental design

No.	E[perimental results			
	Y ₁ -densi-ty, kg/m ³	Y ₂ -Water absorp-tion, %	Y ₃ -com-pressive strength, MPa	Y ₄ -flexural strength, MPa
1	1270	27	0.150	2.60
2	1271	25.2	0.145	2.66
3	1544	17.4	0.190	5.00
4	1280	22.3	0.800	5.11
5	1330	14.7	0.126	5.12
6	1350	12.6	0.140	9.37
7	1940	9.3	0.142	1.875
8	1950	14.2	0.996	2.093???
9	1480	15.4	0.936	8.432???
10	1490	12	10.110	5.625
11	1470	20.4	0.950	4.307???
12	1270	8	1.110	5.620
13	1615	9	1.360	7.370???
14	1640	10.3	1.620	1.775
15	1590	10.5	2.061	1.357
16	1585	11.3	1.312	0.130
17	1760	11.0	9.372	0.040???
18	1757	9.2	1.52	0.140
19	1689	12	2.610	0.110
20	1630	12.7	2.322	0.092
21	1645	13	8.123	0.012 ?
22	1666	12	7.971	0.011?
23	1488	11	1.560	0.012
24	1515	12	0.821	0.026
25	1576	12.7	1.08	0.034
26	1482	13,6	1.310	0.050
27	1564	12.7	1.920	0.007

positively affects density; negative interactions (X_3X_4 , X_3X_5 , X_4X_5) indicate that simultaneous increases in filler and fibers lead to a more porous structure.

Quadratic terms indicate an optimum X_1^2 increases density → optimum near the upper limit of marble chips; X_4^2 and X_5^2 decrease density → increasing reinforcement above a certain level leads to structural defects.

Practical significance of the model. The model allows prediction of density across the full range of formulations. It enables optimization of composition using partial derivatives, response surface analysis, and the Harrington's desirability function. It helps eliminate materials that worsen properties under certain combinations and

provides the possibility to design compositions without performing a full cycle of tests.

Analysis of two types of composite materials. After the experiment and calculation of the regression coefficients of the composite material (CM) property models, their analysis was performed for two types of CM: 1) Composite material with modified cement binder and basalt fiber (CMB) — polypropylene fiber 0%; 2) Composite material with modified cement binder and polypropylene fiber (CMP) — basalt fiber 0%.

Based on the ES model (1) and setting factors X_4 and $X_5 = -1$, the property models for the two different cement composites were obtained:

for CMB at ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$) and for CMP at ($x_4 = -1$, $X_4 = 0\%$).

The five-factor model Y_1 was reduced to a four-factor model $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ under the condition $X_5 = -1$ ($X_5 = -1$, without polypropylene fiber = 0%).

$$Y_1 (\text{density, kg/m}^3) = 1619.01 - 60.73 x_1 + 62.94 x_2 + 129.11 x_3 - 31.18 x_4 + 102.09 \cdot x_1^2 + 3.09 \cdot x_2^2 - 0.91 \cdot x_3^2 - 154.91 x_4^2 + 70.07 x_1 x_2 + 35.44 \cdot x_1 x_3 + 30.19 \cdot x_1 x_4 - 38.07 x_2 x_3 - 29.06 \cdot x_2 x_4 - 120.94 \cdot x_3 x_4. \quad (2)$$

CMP ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$)

The five-factor model Y_1 was reduced to a four-factor model $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ under the condition $X_4 = -1$ ($X_4 = -1$, without basalt fiber = 0%).

$$Y_1 (\text{density, kg/m}^3) = 1557.62 - 58.86 x_1 + 61.06 x_2 + 194.74 \cdot x_3 - 24.07 x_5 + 102.09 \cdot x_1^2 + 3.09 \cdot x_2^2 - 0.91 \cdot x_3^2 - 86.41 \cdot x_5^2 + 70.07 x_1 x_2 + 35.44 \cdot x_1 x_3 + 32.06 \cdot x_1 x_5 - 38.07 x_2 x_3 - 30.94 \cdot x_2 x_5 - 55.31 x_3 x_5. \quad (3)$$

Based on the results of the five-factor H_a5-type experiment, a quadratic regression model for the density of the composite material (Equation 1) was obtained, accounting for linear, quadratic, and pairwise interaction effects of the factors.

Analysis of the regression coefficients shows that the most significant influence on density is exerted by the marble dust content (X_3), as well as the amounts of basalt fibers (X_4) and polypropylene fibers (X_5).

The positive coefficient for factor X_3 indicates that an increase in marble dust content promotes an increase in the density of the composite material. This can be explained by the improved particle size distribution of the mixture and denser packing of the cement matrix particles.

In contrast, increasing the content of basalt and polypropylene fibers (X_4 and X_5) leads to a decrease in density. This effect is caused by the fact that the introduction of fibers reduces mixture compaction and contributes to ad-

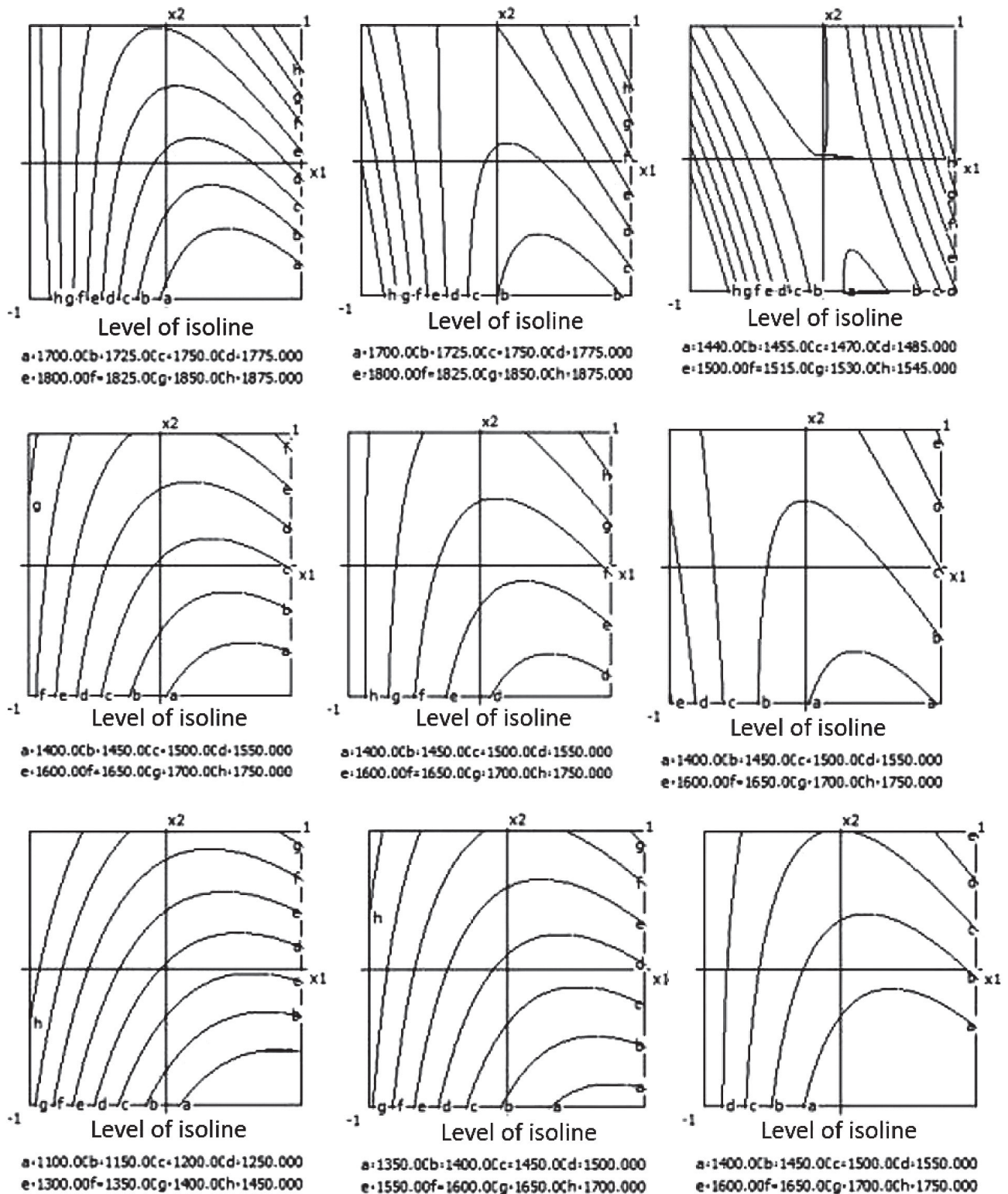


Fig. 1. Formulation region of the composite material $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ under the condition $X_5 = -1$ (i.e., without polypropylene fiber, 0%)

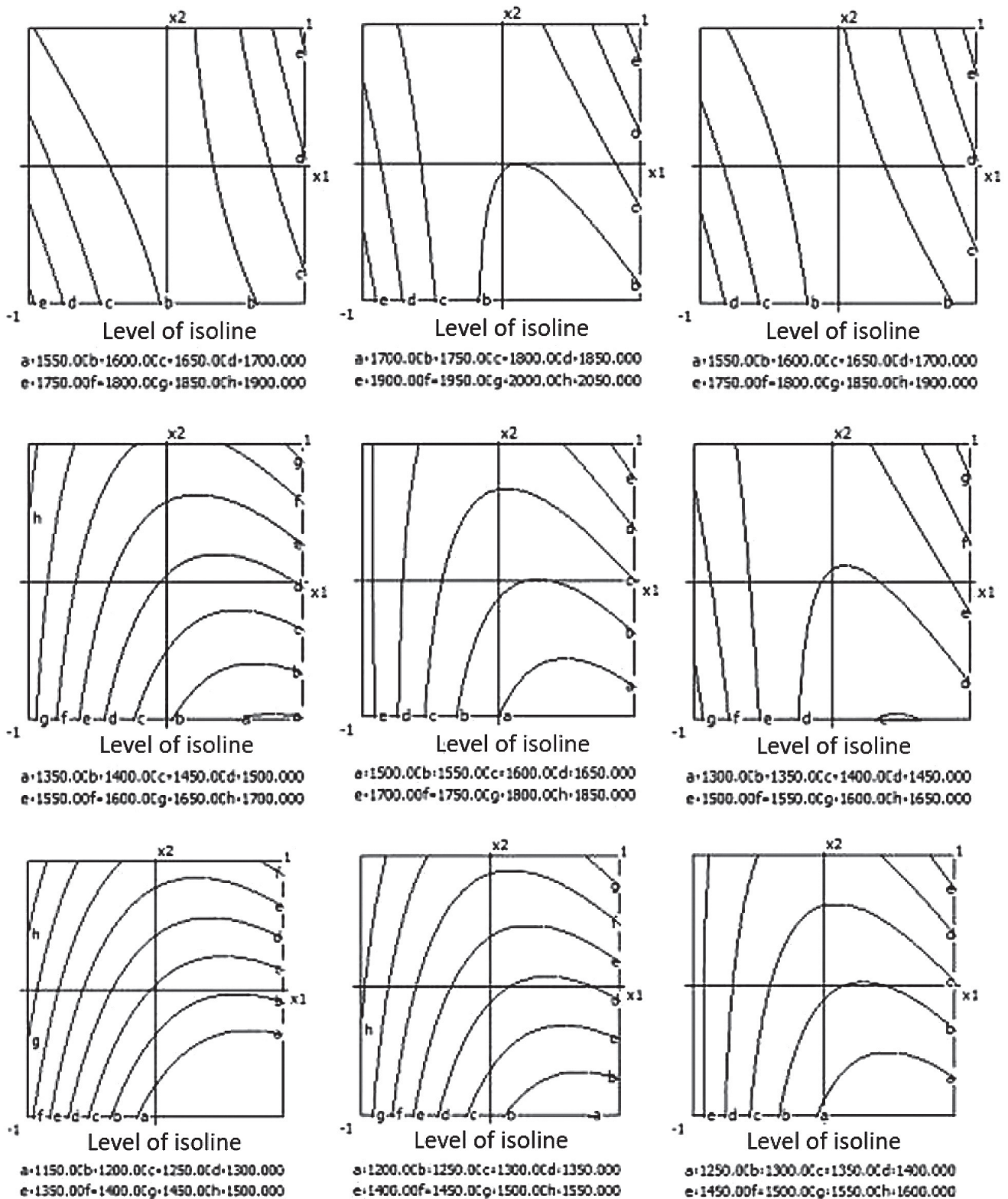


Fig. 2. Formulation region of the composite material $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3, X_5)$ at $X_4 = -1$ (i.e., without basalt fiber, 0%)

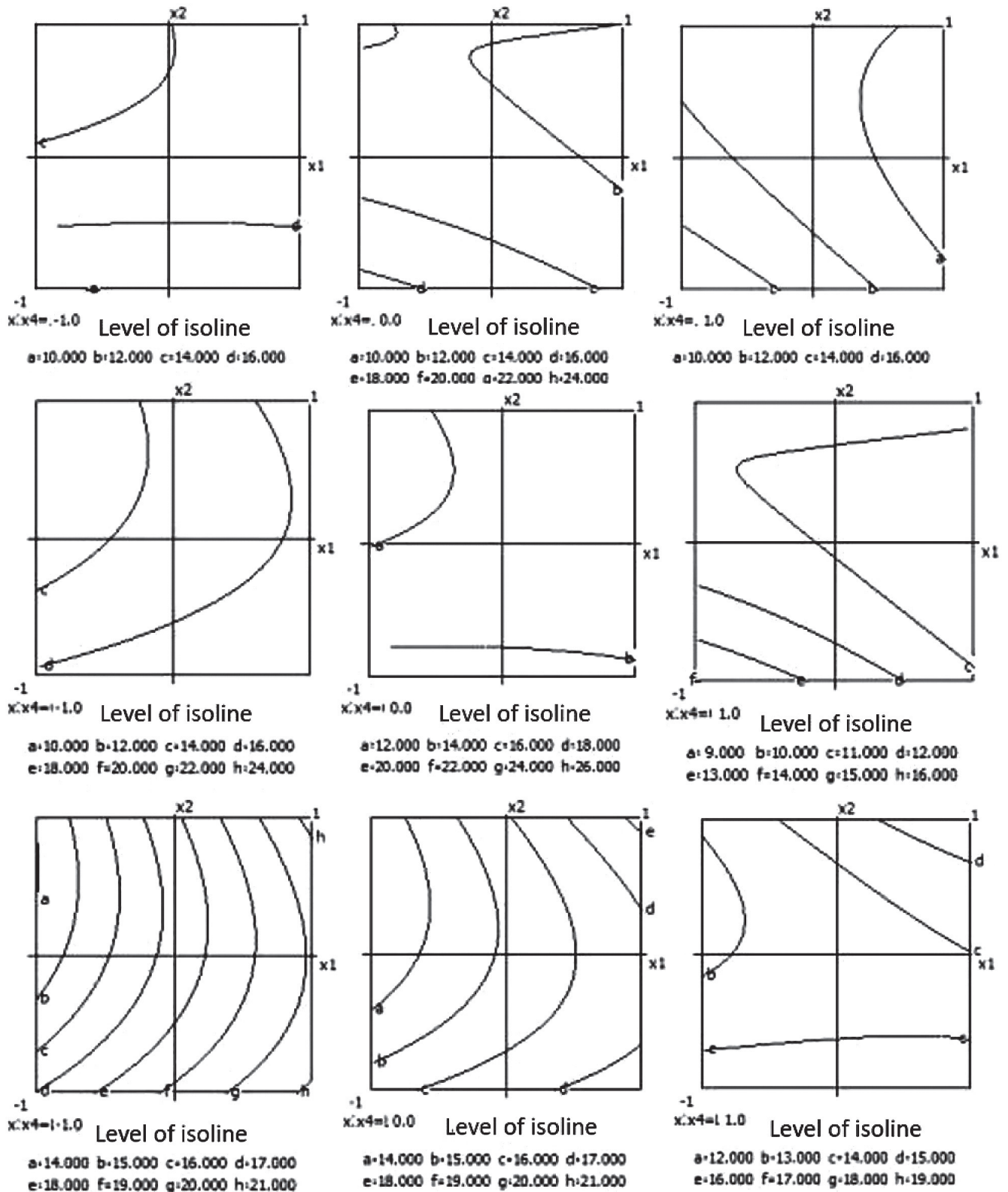


Fig. 3. Water absorption of the composite material $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ at $X_5 = -1$ $X_5 = -1$ $X_5 = -1$ (i.e., without polypropylene fiber, 0%)

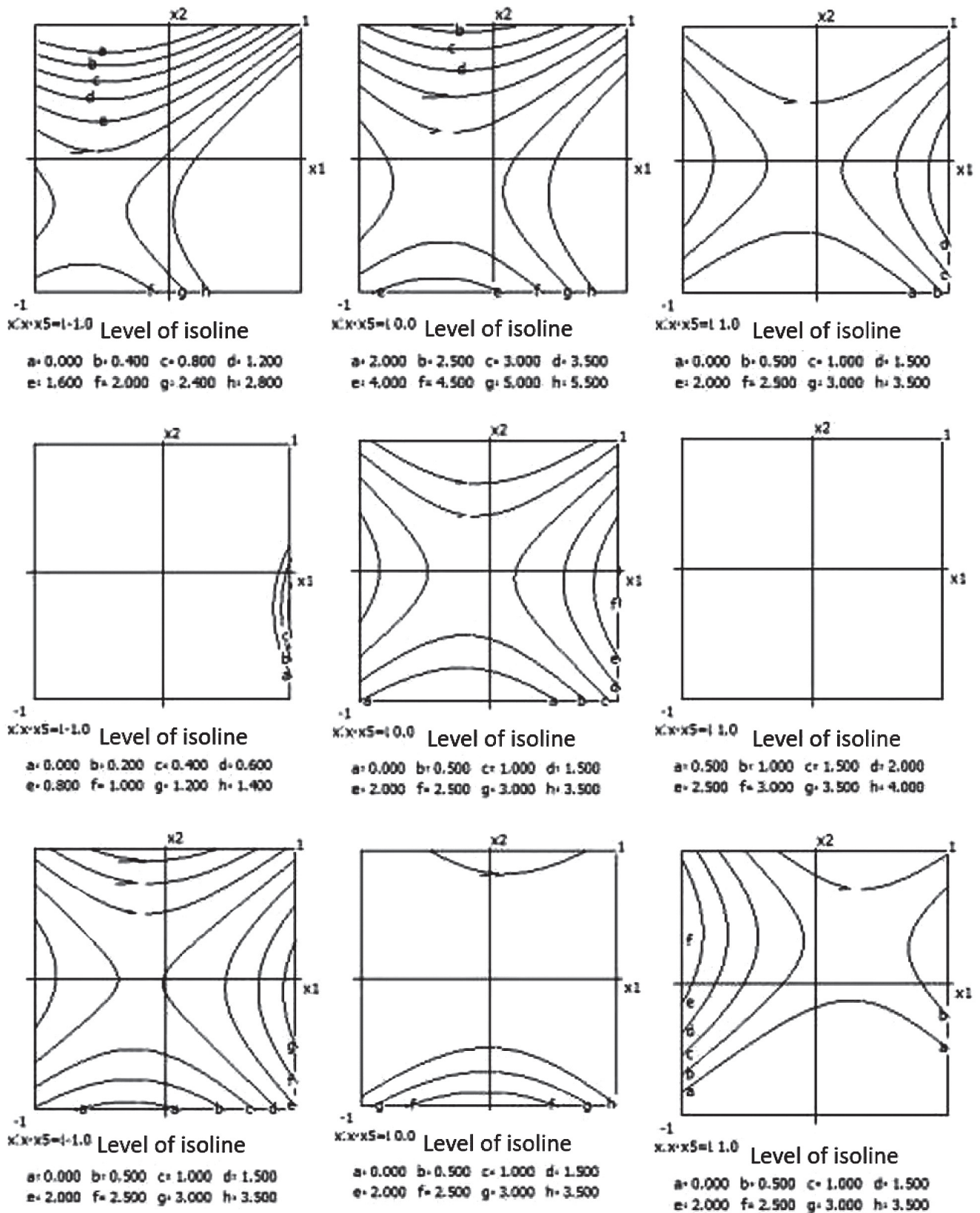


Fig. 4. Water absorption of the composite material $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3, X_5)$ at $X_4 = -1, X_4 = -1, X_4 = -1$ (i.e., without basalt fiber, 0%)

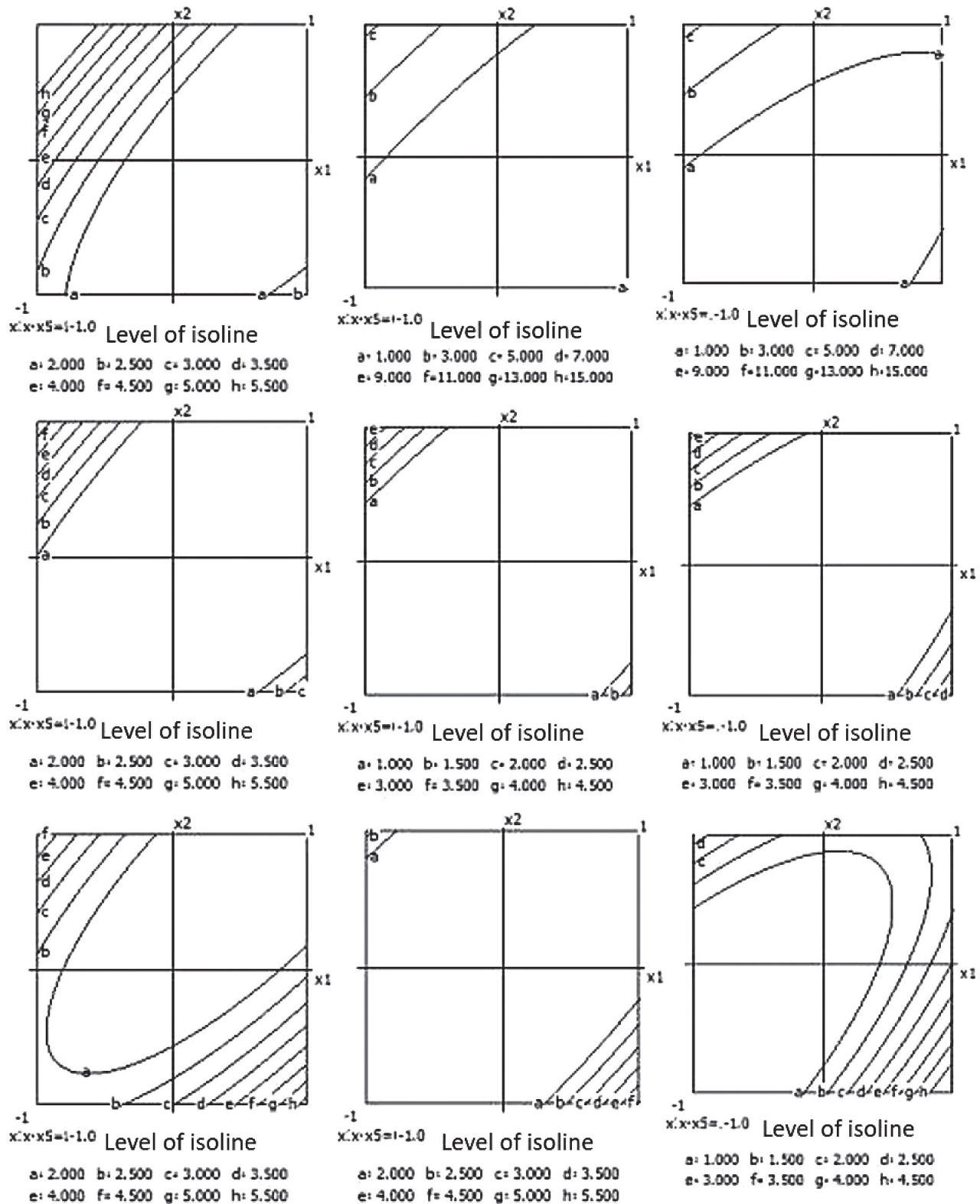


Fig. 5. Compressive strength of the composite material $Y_3 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ at $X_5 = -1X_5 = -1X_5 = -1$ (i.e., without polypropylene fiber, 0%)

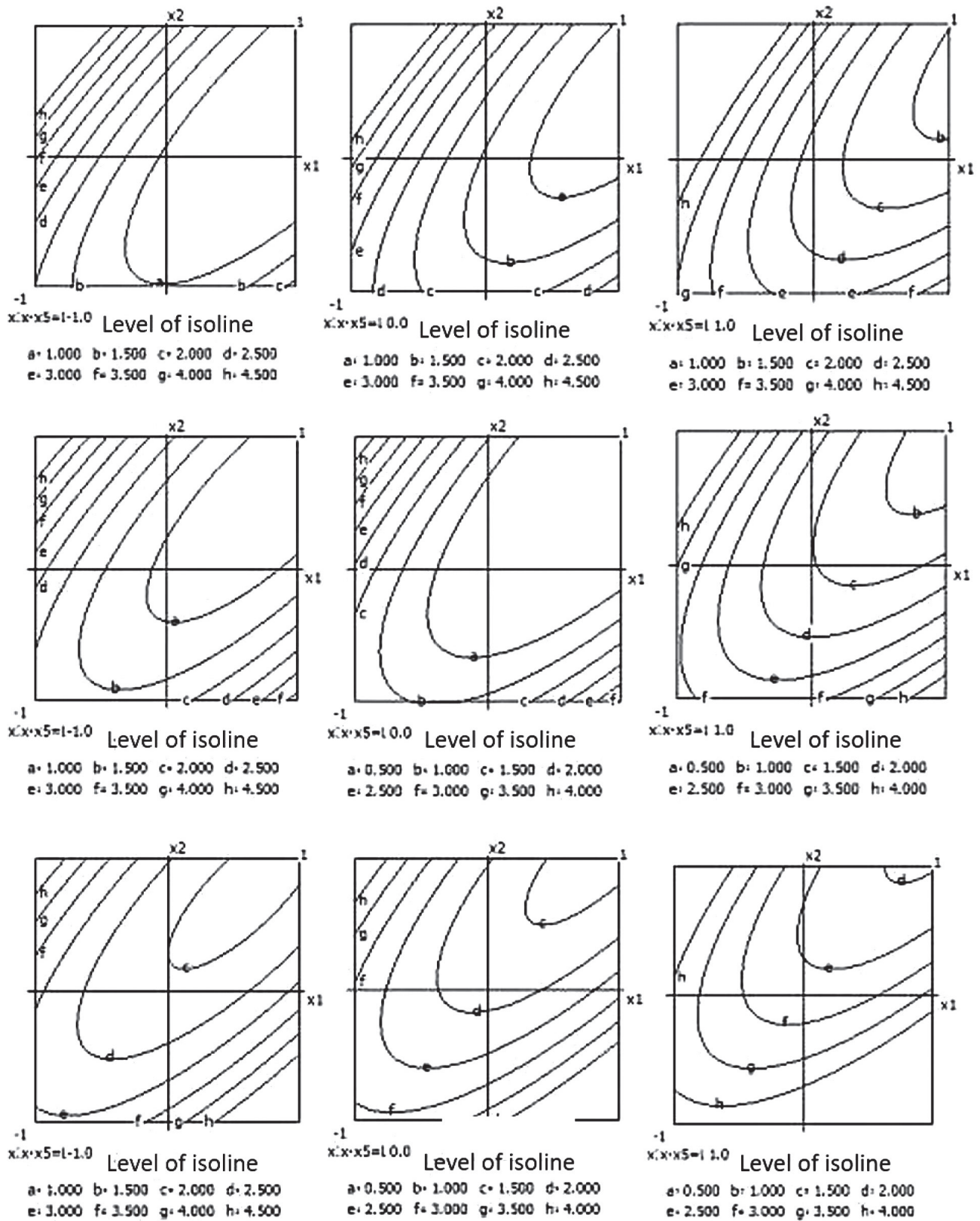


Fig. 6. Compressive strength of the composite material $Y_3 = f(X_1, X_2, X_3, X_5)$ at $X_4 = -1X_4 = -1X_4 = -1$ (basalt fiber 0%)

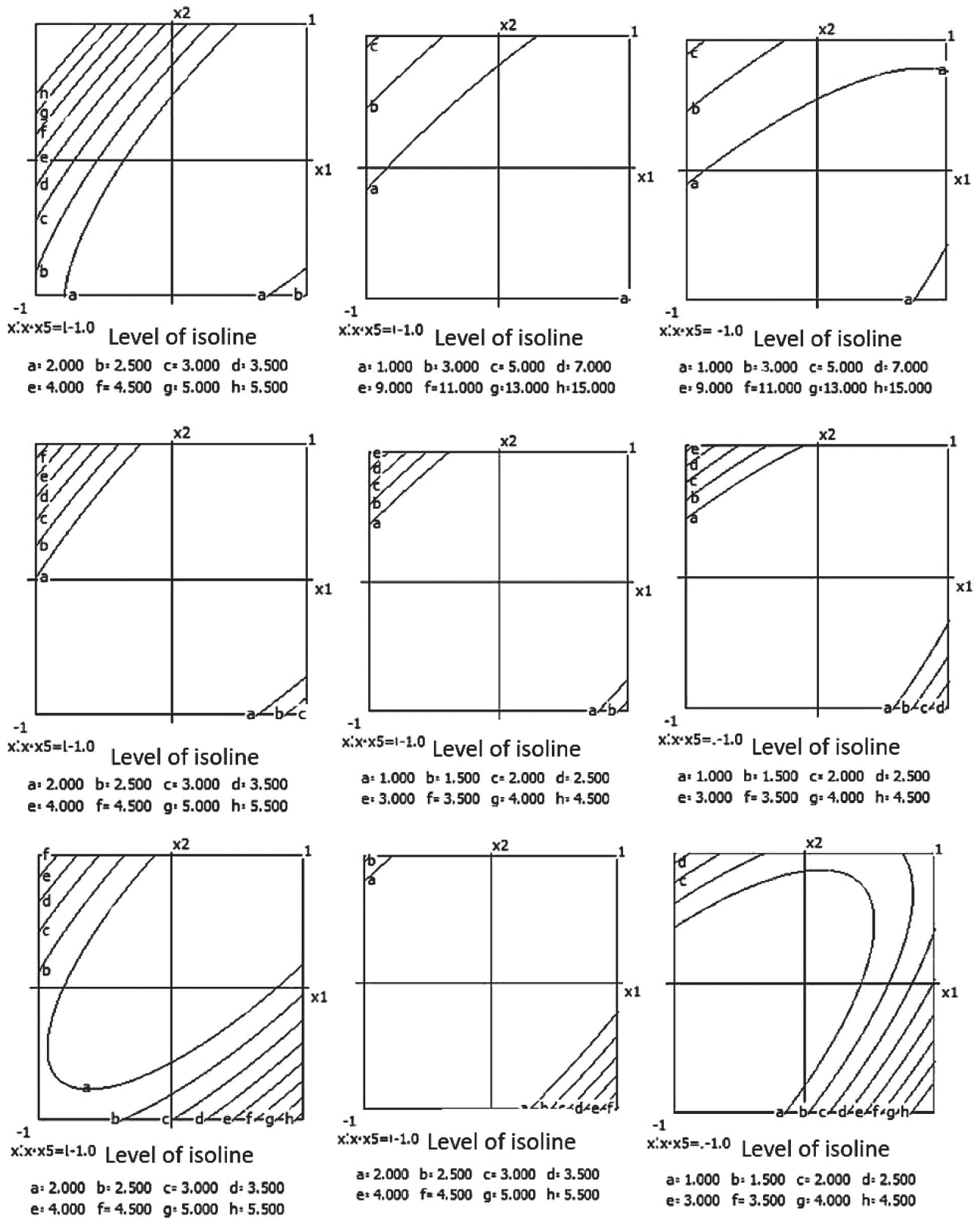


Fig. 7. Flexural strength of the composite material $Y_4 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ at $X_5 = -1$ (i.e., without polypropylene fiber, 0%)

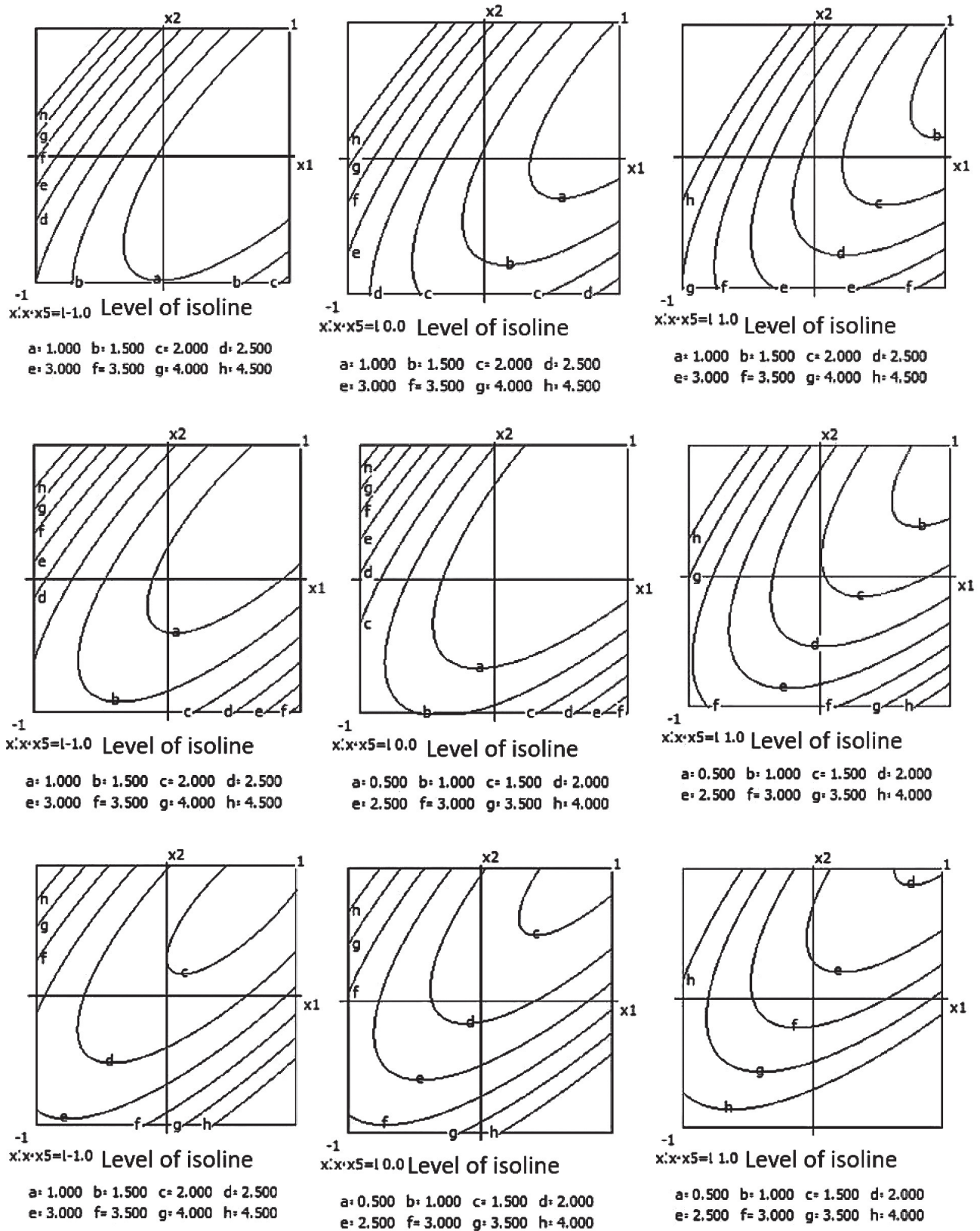


Fig. 8. Flexural strength of the composite material $Y_4 = f(X_1, X_2, X_3, X_5)$ at $X_4 = -1, X_4 = -1, X_4 = -1$ (basalt fiber 0%)

ditional porosity due to the formation of interfacial zones between fibers and the cement matrix.

The quadratic coefficients for X_4^2 and X_5^2 are negative, indicating the presence of an optimal fiber content range. Exceeding a certain fiber concentration leads to structural deterioration and reduced density due to the formation of defects and local voids.

Significant effects are also observed for factor interactions. In particular, the negative coefficients of the interactions X_3X_4 and X_3X_5 suggest that simultaneous increases in marble dust and fiber content reduce material density. This is associated with the fact that an excess of fine filler in the presence of fibers worsens compaction and results in a more porous structure.

Thus, the obtained model allows for a quantitative assessment of the influence of formulation factors on composite density and for identifying optimal composition ranges.

The presence of fibers (and especially their increase) leads to a reduction in material density. This is explained by the increase in internal porosity caused by fibers (formation of local voids, reduced compaction during vibration/placement), as well as the fact that the fibers themselves occupy volume and form an irregular matrix structure.

The negative quadratic terms (X_4^2 , X_5^2) indicate a non-linear effect: at low doses, the influence on density is minimal, but at higher doses, the effect sharply increases (threshold deterioration of compaction).

Analysis of the coefficients shows density is significantly increased by X_3 – marble dust. The largest density reduction is caused by fibers X_4 and X_5 (negative coefficients). Strong interactions X_3X_4 , X_3X_5 , and X_4X_5 indicate that fibers reduce compaction when there is an excess of fine filler.

Key patterns include increasing marble dust (X_3) reduces water absorption (negative coefficients). Fibers, on the contrary, increase Y_2 (coefficients X_4 , $X_5 > 0$). The influence of interactions X_1X_3 , X_1X_4 , and X_2X_5 indicates combined mechanisms of pore formation.

Fibers increase water absorption through a mechanism in which they create additional capillary paths and local defects in the fiber–matrix interfacial zone, thereby increasing permeability.

Positive interactions (especially X_3X_4) indicate that the combination of fine dust and fibers can sometimes enhance water-retaining channels, possibly due to the formation of a fine porous structure around the fibers.

$$\begin{aligned}
 Y_2 \text{ (water absorption, \%)} = & 11,369 + 0,611 x_1 + \\
 & + 0,394 x_2 - 0,344 x_3 + 0,933 x_4 + 0,772 x_5 - \\
 & - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 0,297 x_4^2 + \\
 & + 1,947 x_5^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 - \\
 & - 1,137 x_1 x_4 + 1,10 x_1 x_5 - 0,612 x_2 x_3 + \\
 & + 0,325 x_2 x_4 + 1,387 x_2 x_5 + 3,487 x_3 x_4 + \\
 & + 1,65 x_3 x_5 + 2,862 x_4 x_5.
 \end{aligned} \quad (4)$$

$Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ under the condition $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, without polypropylene fiber = 0%)

Formula of the 4-factor model: $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$.

$$\begin{aligned}
 Y_2 \text{ (water absorption, \%)} = & 12.544 + \\
 & + 0.489 \cdot x_1 - 0.993 \cdot x_2 - 1.306 \cdot x_3 - 1.929 \cdot x_4 - \\
 & - 1.103 \cdot x_1^2 + 1.147 \cdot x_2^2 + 1.297 \cdot x_3^2 + 0.297 \cdot x_4^2 + \\
 & + 0.764 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1.225 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1.137 \cdot x_1 \cdot x_4 - \\
 & - 0.612 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.325 \cdot x_2 \cdot x_4 + 3.487 \cdot x_3 \cdot x_4.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Formula of the 4-factor model: $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ under $X_4 = -1$ (fiber base 0%).

$$\begin{aligned}
 Y_2 \text{ (water absorption, \%)} = & 10.733 + 1.748 \cdot x_1 + \\
 & + 0.069 \cdot x_2 - 3.143 \cdot x_3 - 2.09 \cdot x_5 - 1.103 \cdot x_1^2 + \\
 & + 1.147 \cdot x_2^2 + 1.297 \cdot x_3^2 + 1.947 \cdot x_5^2 + \\
 & + 0.764 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1.225 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1.10 \cdot x_1 \cdot x_5 - \\
 & - 0.612 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1.387 \cdot x_2 \cdot x_5 + 1.65 \cdot x_3 \cdot x_5.
 \end{aligned} \quad (6)$$

The regression model of water absorption (Equation 3) shows that this property is significantly influenced by the content of marble dust and reinforcing fibers.

The negative coefficient for factor X_3 indicates that increasing the marble dust content leads to a decrease in water absorption. This can be explained by the densification of the material structure and the reduction of open capillary pores.

At the same time, increasing the fiber content (X_4 and X_5) is accompanied by an increase in water absorption. This is due to the formation of additional capillary channels and interfacial defects in the “fiber–cement matrix” contact zone, which enhances the material’s permeability to water.

The significant coefficients for the interactions X_3X_4 and X_3X_5 indicate that the effect of fibers on water absorption depends on the content of the fine filler. At high marble dust content, a fine-porous structure forms around the fibers, which can intensify capillary moisture transport.

Thus, minimizing water absorption is achieved with a high marble dust content and a limited amount of reinforcing fibers.

$$\begin{aligned}
 Y_3 \text{ (Compressive strength, MPa)} = & 3,92 + \\
 & + 0,981 x_1 - 0,557 x_2 + 0,497 x_3 + 0,475 x_4 - \\
 & - 0,621 x_5 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - \\
 & - 2,979 x_4^2 - 2,975 x_5^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + \\
 & + 0,63 x_1 x_4 - 0,597 x_1 x_5 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + \\
 & + 0,591 x_2 x_5 + 0,412 x_3 x_4 - 0,429 x_3 x_5 - 1,048 x_4 x_5.
 \end{aligned}$$

The five-factor model of Y_3 was transformed into a four-factor model: $Y_3 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ under the condition $X_5 = -1$, which corresponds to the absence of polypropylene fiber (0%).

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 1,566 + 1,578 x_1 - 1,148 x_2 + 0,925 x_3 + \\
 & + 1,523 x_4 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - \\
 & - 2,979 x_4^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + \\
 & + 0,63 x_1 x_4 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + \\
 & + 0,415 x_3 x_4.
 \end{aligned} \quad (7)$$

The obtained regression model for compressive strength (Equation 6) demonstrates the complex influence of formulation factors on the strength characteristics of the composite material.

The marble powder (X_2) has the greatest positive effect on strength, which is confirmed by a significant positive quadratic coefficient. Fine marble particles act as a microfiller, contributing to the densification of the cement matrix and the formation of a stronger structure.

Basalt fibers (X_4) also have a positive effect on compressive strength. This can be explained by their reinforcing effect: the fibers inhibit the propagation of microcracks and provide redistribution of stresses within the composite structure.

Polypropylene fibers (X_3), on the contrary, have a less favorable effect on strength. A probable reason is the relatively weak adhesion of polypropylene fibers to the mineral matrix, which may lead to the formation of local defects and a decrease in the load-bearing capacity of the material.

The negative quadratic coefficients for X_4^2 and X_3^2 indicate that excessive fiber content leads to a decrease in strength. This confirms the existence of an optimal reinforcement range.

DISCUSSION

The constructed two-dimensional nomograms (Figures 1–8) clearly illustrate the influence of the studied factors on the properties of the composite material and allow determination of the optimal regions of formulation parameters. Analysis of the nomograms shows that maximum strength values and minimum water absorption are achieved with increased marble powder content and a moderate amount of basalt fibers.

The optimal formulation region corresponds to the following factor ranges:

- Marble chips — 25–30%
- Marble powder — 10–15%
- Marble dust — approximately 12%
- Basalt fiber — 2–4%
- Polypropylene fiber — no more than 1–2%

Within this region, the most favorable combination of density, strength, and water absorption is achieved. For formulations requiring low water absorption, fiber-containing compositions require additional optimization: reduce X_4/X_5 , increase dust content X_3 (for better packing), and consider the use of superplasticizers or hydrophobic additives.

Polypropylene fibers increase water absorption almost as much as basalt fibers; therefore, their use should be limited when minimizing moisture uptake is a priority.

In the full five-factor model, the coefficient for X_4 is positive (+0.475), while that for X_5 is negative (−0.621). In the four-factor section with $X_5 = -1$, basalt fiber has a significant positive effect (coefficient +1.523). Quadratic and interaction terms indicate that the benefit from fibers has a maximum at moderate doses: a strong positive quadratic term X_3^2 (marble dust) and a negative quadratic term X_4^2 (−2.979 in the five-factor model) confirm this.

Key observations:

- 1) Marble dust (X_2) has the greatest positive effect on compressive strength (large positive quadratic coefficient).
- 2) Basalt fiber (X_4) increases strength, whereas polypropylene fiber (X_3) reduces it in the full model.
- 3) The greatest weakening occurs through $X_4 \cdot X_5$ interactions, indicating competition between reinforcing phases.

Regression model analysis shows that basalt fibers (X_4) and polypropylene fibers (X_3) differently affect key properties of fiber-reinforced concrete. Basalt fibers improve strength properties (especially compressive and flexural strength) at moderate doses but reduce density and increase water absorption if overdosed. Polypropylene fibers more often negatively affect density and compressive strength and increase water absorption; their use is advisable in small doses or to exclude when density and strength are priorities.

Mechanisms: 1) Basalt fibers improve compressive strength via a reinforcing effect, preventing crack formation and propagation and redistributing stresses in the matrix. 2) Polypropylene fibers reduce compressive strength; probable causes include poor adhesion to the mineral matrix, voids around fibers, or poor compaction during placement.

For compressive strength, moderate doses of basalt fiber are preferable ($X_4 = 2–4\%$). Polypropylene fibers should be avoided or minimized if compressive strength is critical; alternatively, adhesion can be improved via fiber surface treatment or surfactant additives.

The Y_4 model shows a positive contribution from X_4 (approximately +0.119...+0.168 in different sections) and a negligible or weak effect of X_5 (in some variants the coefficient is $\sim +0.51 \cdot X_5$, but overall the dependence is complex with strong quadratic and interaction terms).

Observed patterns: Strength increases with X_2 and X_3 . Fibers affect properties differently: basalt fibers (X_4) enhance flexural strength; polypropylene fibers reduce it in the absence of X_4 ; significant interactions $X_1 \cdot X_2$, $X_2 \cdot X_3$, $X_3 \cdot X_4$ determine the formation of the composite framework.

Basalt fiber increases flexural strength by strengthening the interphase zone and redistributing tensile stresses. Polypropylene fibers moderately affect flexural strength (positive in some models, neutral in others) as they help

controlled crack formation but do not significantly increase compressive or flexural strength under weak adhesion conditions.

Recommendations for basalt fibers (X_4): recommended working dose: $\approx 2\text{--}3\%$ (within our range: $2\% = \text{level } 0$; $4\% = +1$); use to increase compressive and flexural strength, while controlling mixture compaction; for doses $>4\%$, adjust compaction techniques (vibration, superplasticizers) and check for increased porosity

Recommendations for polypropylene fibers (X_5): small doses ($0.5\text{--}2\%$) if the goal is crack control and impact/deformation resistance; exclude (0%) if density and compressive strength are the primary goals. Adhesion improvement recommended via fiber surface modification or bonding additives. Fiber combinations: combined reinforcement (basalt + PP) is possible but requires optimization, usually main load on basalt fibers ($2\text{--}3\%$), PP in small amount ($\leq 1\text{--}2\%$) for crack control. Optimal compositions ensure minimal water absorption, maximum compressive (Y_3) and flexural strength (Y_4), rational density, and technological feasibility.

Optimal component ranges based on graphical areas and derivative analysis:

X_1 (chips): $0\text{...}+1$ ($25\text{--}30\%$)

X_2 (powder): $0\text{...}+1$ ($10\text{--}15\%$)

X_3 (dust): $+1$ (12%) — main strengthening component

X_4 (basalt fiber): $0\text{...}+1$ ($2\text{--}4\%$)

X_5 (PP fiber): -1 (0%) or maximum $1\text{--}2\%$

The conducted five-factor experiment of type N_5 allowed us to construct an adequate quadratic mathematical

model of the composite material density, accounting for linear, quadratic, and pairwise interactions of factors. Analysis of the significance of coefficients showed that the greatest influence is exerted by the content of marble powder, basalt fibers, and polypropylene fibers, as well as their interactions. Based on the model, four-factor sections of the formulation region were created by excluding specific types of fibers, which made it possible to determine the optimal composition ranges for achieving minimal water absorption and maximal density.

CONCLUSION

1. Basalt fibers are an effective tool for increasing the strength characteristics of fiber-reinforced concrete at moderate doses ($\approx 2\text{--}3\%$), but they reduce density and increase water absorption when overdosed.

2. Polypropylene fibers in our models more often reduce density and compressive strength and increase water absorption; their use should be limited to small doses and only when an increase in crack resistance is necessary.

3. There are clear nonlinear dependencies and interactions with fillers (in particular, with marble powder X_3), so composition optimization must be multi-criteria and followed by experimental validation.

4. The best combination of properties is achieved by using marble powder and basalt fibers. Polypropylene fiber, in most cases, deteriorates properties and should be used sparingly.

REFERENCES

- Ormonbekov T.O. *Techniques and technology of basalt fiber production*. Bishkek: Ilim; 2005.
- Abdykalykov A., Aidaraliev Zh.K., Abdykalyk kyzy Zh., Kuduev A.Zh., Rashid kyzy B. Suitability of basalt raw materials of the Kyrgyz Republic for the production of superfine and continuous fibers. *Nanotechnologies in Construction*. 2023;15(6):574–582. doi:10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582
- Pashchenko A.A., Serbin V.P., Paslovskaya P. et al. *Reinforcement of inorganic materials with mineral fibers*. Moscow: Stroyizdat; 1988.
- Mailyan L.R., Stelmakh S.A., Kholdnyak M.G., Shcherban E.M. Selection of fiber types for dispersed reinforcement of centrifuged concrete products. *Naukovedenie*. 2017;9:4.
- Zhukov A.D., Rudnitskaya V.A., Smirnova T.V. Reinforcing fibers in concrete technology. *Vestnik MGSU*. 2012;4:160–164.
- Gurieva V.A., Belova T.K. Technology for preparing cement mortars dispersed reinforced with modified micro-fibers. *Vestnik SUSU. Construction and Architecture*. 2016;16(1):41–45. doi:10.14529/build160106
- Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Basalt fiber as a component for micro-reinforcement of cement composites. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012;4:58–61.
- Knotko A.B., Meledin A.A., Sudyin V.V., Garshev A.V., Putlyaev V.I. Surface layer modification of basalt fiber to increase corrosion resistance in fiber-cement composites. *Building Materials*. 2010:89–93.
- Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Savgir N.L. On the alkali resistance of basalt fiber in cement system. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013;2:63–66.

10. Pavlova I.P., Belomesova K.Yu. Durability of basalt fiber in alkaline environment of hydrating cement systems. *Vestnik of Polotsk State University. Series F.* 2022;8:81–88.
11. Kondrashov G.M., Goldshtein B.M. Basalt fiber concrete – technology of the future. *Vestnik Volgograd State University. Innovations.* 2012;7:91–93.
12. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Netrebenko A.V., Durachenko A.V. Fine-grained fiber concrete reinforced with polypropylene fiber. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov.* 2014;4:67–72.
13. Al Helo O., Osipchik V.S., Kravchenko T.P. Composite materials based on filled polypropylene with improved performance characteristics. *Chemistry and Chemical Technology.* 2007;21(5):66–70.
14. Klyuev S.V., Avilova E.N. Fine-grained fiber concrete using polypropylene fiber for road pavement. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov.* 2013;1:37–40.
15. Okolnikova G.E., Yochich M., Kurlin M. Prospects for using poly-dispersed reinforced fiber concretes. *System Technologies.* 2021;38:86–88.
16. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Evtushenko E.I. Study of chemical interaction of fiberglass with cement hydration products. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov.* 2020;12:119–125.
17. Leonovich I.A., Leonovich A.A. Failure mechanism of fiber concretes based on micro-sphere fillers. *Vestnik Belarusian-Russian University.* 2009;4(25):149–158.
18. Nakhayev M.R. Interphase phenomena during wetting of electrostatic fiber concrete. *Vestnik Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2022;49(1):140–148.
19. Mukhametrahimov R.Kh., Galautdinov A.R., Garafiev A.M. Structure and properties of fibrous composites based on modified mineral binders. *Izvestiya KGASU.* 2020;4(54):62–71.
20. Vishnevskaya Ya.Yu., Trunov P.V., Kalatozi V.V., Bondarenko D.O. Prospects for improving efficiency of fiber concretes using composite binders. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov.* 2013;3:35–37.
21. Leonovich I.A. Strength properties of fiber concretes with micro-sphere fillers under impact loading. *Vestnik Belarusian-Russian University.* 2008;2(19):129–136.
22. Ovcharenko G.I., Pesotsky A.V., Avvakumov E.G. Influence of mineral micro-additives on cement stone strength. *Polzunov Bulletin.* 2014;1:130–134.
23. Aidaraliev Zh.K., Kainazarov A.T., Rashid kyzy B., Pugacheva I.N., Suyunbek uulu A. Optimization of composition and properties of ceramic composite based on barite and bentonite. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(6):715–732. doi:10.15828/2075-8545-2025-17-6-715-732
24. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S. Fine-grained dispersed reinforced concretes based on complex modifying additives. *Building Materials.* 2016;9:68–72.
25. Golik V.I., Dmytrak Yu.V., Khulelidze K.K., Tsidavaev B.S. Influence of activation of mineral additives to binder on concrete mixture strength. *Mining Information-Analytical Bulletin.* 2019;6:66–78.
26. Harun M., Koroteev D.D., Dhar P., Zhdere S., Elroba Sh.M. Physico-mechanical properties of basalt fiber reinforced high-strength concrete. *Construction Mechanics of Engineering Structures and Facilities.* 2018;14(5):396–403.
27. Afanasyev E.N., Zharikov I.V., Tarasov S.N., Soldatova N.I., Muftieva L.R., Ponomarev M.M. Method for producing pipes from concrete mixtures. RU patent 2200657; 2002 Mar 20.
28. Erofeev V.T., Kretov D.A. Review of patents on manufacturing products under pressure from high-strength fiber concrete. *Expert: Theory and Practice.* 2022;2(17):32–35.
29. Ibe E.E., Shugurova A.V. Prospects for using fiber concrete in hydraulic structures construction. *Naukovedenie.* 2017;9(1):1–8.
30. Shirinzade I.N., Akhmedov N.M. Ways to improve fiber concrete efficiency. *International Research Journal.* 2017;3(57):107–110.
31. Levkovich T.I., Tokar N.I., Mevlidinov Z.A., Lasman I.A., Fedorov I.S., Lasman V.S. Development and study of cement-fiber concrete compositions for road construction. *Vestnik of Eurasian Science.* 2021;1.
32. Alekseev K.N., Kurilko A.S. Development of fine-grained impact-resistant fiber concrete for use in cryolithozone mines. *Mining Information-Analytical Bulletin.* 2021;12-1:15–28.
33. Method of molding fiber concrete products. SU patent 1425091; 1988 Sep 23.
34. Bondarev Yu.L., Popov V.A., Bondraeva I.L. Method for preparing fiber concrete mixtures. RU patent 2194614; 2002 Dec 20.
35. Ryabov G.G., Stenyakin A.N., Khmelevsky M.V. Composite raw material mixture for fiber concrete production. RU patent 2770375; 2022 Apr 15.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors state that when preparing the article, they used AI only to check grammar and improve the content of the text.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akymbek Abdykalykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 720044, Bishkek, 66, Ch. Aitmatov Prospekt, Kyrgyz Republic, abdykalykov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7260-8738>

Zhanbolot K. Aidaraliev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 720044, Bishkek, 66, Ch. Aitmatov Prospekt, Kyrgyz Republic, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Zhympargul Abdykalyk kyzy – Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, 265a, Chui Prospekt, Kyrgyz Republic, gold_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4958-1240>

Nematilla A. Sopubekov – Cand. Sci. (Eng.), Department of Technical Sciences, Osh Technological University, 723503, Osh, 81 Isanova St., Kyrgyz Republic, nematsopubekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7309-0292>

Akzhol Suiunbek uulu – Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, 265a, Chui Prospekt, Kyrgyz Republic, akzhol.toktomushov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9477-4944>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Akymbek Abdykalykov – collection of material from literary sources.

Zhanbolot K. Aidaraliev – concept of the study.

Zhympargul Abdykalyk kyzy – realization of the experimental part.

Nematilla A. Sopubekov – scientific editing of the text.

Akzhol Suiunbek uulu – final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 05.03.2026; approved after reviewing 04.04.2026; accepted for publication 09.04.2026.

Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей

Акымбек Абдыкалыков¹ , Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев^{1*} , Жыпаргуль Абдыкалык кызы² ,
Нематилла Абдилахатович Сопубеков³ , Акжол Суйунбек уулу² 

¹ Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, корпус № 1, ауд.: 1/432, Кыргызстан

² Институт физики имени Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызстан

³ Ошский технологический университет, Ош, 723503, ул. Исанова 81, Кыргызстан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из наиболее перспективных материалов для дисперсного армирования бетонов является базальтовое волокно. Оно характеризуется высокой прочностью, термической и химической стойкостью, а также экологической безопасностью. Применение армирующих фибр позволяет значительно повысить прочность бетона при изгибе и растяжении, а также улучшить его водостойкость и устойчивость к динамическим нагрузкам. Ряд исследований показывает, что введение базальтовой фибры способствует повышению прочности композитов на сжатие и изгиб, а также увеличению их трещиностойкости. При оптимальном содержании волокон формируется пространственный армирующий каркас, который повышает энергоёмкость разрушения материала и его устойчивость к внешним воздействиям. **Методы и материалы.** С целью определения оптимального состава фибробетона был проведён пятифакторный эксперимент по плану Na_5 . Были выбраны следующие компоненты рецептурного состава: мраморная крошка (МК), мраморный порошок (МП), мраморная пыль (М-пыль), базальтовые фибры (ФБ), полипропиленовые фибры (ФП), а также связующее – портландцемент. Фибробетоны изготавливались по следующей технологии: мраморные наполнители различных фракций, армирующие фибры и портландцемент предварительно перемешивались в сухом состоянии в течение 10 минут, после чего добавлялось необходимое количество воды. Полученная смесь перемешивалась в течение 30 минут и формовалась в специальные формы для проведения физико-технических исследований. Через 24 часа образцы подвергались обработке водяным паром в течение 30 минут, после чего через трое суток проводились испытания на плотность, водопоглощение и прочность. В соответствии с планом эксперимента типа Na_5 было получено 27 составов фибробетона. По результатам эксперимента методом наименьших квадратов были определены коэффициенты регрессии и модели исследуемых свойств фибробетона с мраморными наполнителями. Также были построены графические образы экспериментально-статистических моделей в виде двумерных номограмм.

Результаты. Установлено, что комбинированное армирование базальтовыми (ФБ) и полипропиленовыми (ФП) фибрами возможно, однако требует оптимизации их соотношения. Наиболее эффективной является схема, при которой основная армирующая роль принадлежит базальтовым фибрам (2–3%), тогда как полипропиленовые фибры вводятся в небольших количествах (до 1–2%) для контроля трещинообразования. Анализ графических областей и производных функций показал следующий оптимальный диапазон содержания компонентов: мраморная крошка – 25–30%, мраморный порошок – 10–15%, мраморная пыль – около 12%, базальтовые фибры – 2–4%, полипропиленовые фибры – 0–2%. **Заключение.** Базальтовые фибры являются эффективным средством повышения прочностных характеристик фибробетона при умеренном содержании (около 2–3%). Однако их избыточное количество приводит к снижению плотности и увеличению водопоглощения материала. Полипропиленовые фибры в большинстве случаев снижают плотность и прочность на сжатие и увеличивают водопоглощение, поэтому их применение целесообразно ограничивать малыми дозами и использовать преимущественно для повышения трещиностойкости. Наилучший комплекс физико-механических свойств достигается при использовании мраморной пыли в сочетании с базальтовой фиброй.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, базальтовое волокно, фибры базальтовые, фибры полипропиленовые, экспериментально-статическое моделирование, прочность фибробетона, номограммы

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная научная работа выполнена при поддержке Министерства науки, высшего образования и инноваций Кыргызской Республики. Проект имеет регистрационный номер № 240032 от 15.02.2024 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Сопубеков Н.А., Суйунбек уулу А. Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers

Akymbek Abdykalykov¹ , Zhanbolot K. Aidaraliev^{1*} , Zhympargul Abdykalyk kyzy² ,
Nematilla A. Sopubekov³ , Akzhol Suiunbek uulu² 

¹ Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aitmatov Avenue 66, Building № 1, Room: 1/432, Kyrgyzstan

² Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Chuy Avenue 265a, Kyrgyzstan

³ Osh Technological University, Osh, 723503, Isanova Street 81, Kyrgyzstan

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

ABSTRACT

Introduction. One of the most promising materials for dispersed reinforcement of concrete is basalt fiber. It is characterized by high strength, thermal and chemical resistance, as well as environmental safety. The use of reinforcing fibers significantly increases the flexural and tensile strength of concrete and improves its water resistance and resistance to dynamic loads. A number of studies show that the introduction of basalt fiber contributes to an increase in the compressive and flexural strength of composites, as well as their crack resistance. With an optimal fiber content, a spatial reinforcing framework is formed, which increases the energy capacity of material fracture and its resistance to external influences. **Methods and materials.** Fiber-reinforced concretes were produced using the following technology: marble fillers of different fractions, reinforcing fibers, and Portland cement were first mixed in a dry state for 10 minutes, after which the required amount of water was added. The resulting mixture was stirred for 30 minutes and molded into special forms for physical and technical studies. After 24 hours, the samples were treated with water steam for 30 minutes, after which, after three days, tests for density, water absorption, and strength were carried out. According to the experimental plan of the H₅ type, 27 compositions of fiber-reinforced concrete were obtained. Based on the experimental results, regression coefficients of models describing the studied properties of fiber-reinforced concrete with marble fillers were determined using the least squares method. Graphical representations of the experimental–statistical models were also constructed in the form of two-dimensional nomograms. **Results.** It was established that combined reinforcement with basalt fibers (BF) and polypropylene fibers (PF) is possible but requires optimization of their ratio. The most effective scheme is when the main reinforcing role belongs to basalt fibers (2–3%), while polypropylene fibers are introduced in small amounts (up to 1–2%) to control crack formation. The analysis of graphical regions and derivative functions showed the following optimal range of component contents: marble chips – 25–30%, marble powder – 10–15%, marble dust – about 12%, basalt fibers – 2–4%, polypropylene fibers – 0–2%. **Conclusion.** Basalt fibers are an effective means of increasing the strength characteristics of fiber-reinforced concrete at moderate content (about 2–3%). However, their excessive amount leads to a decrease in density and an increase in water absorption of the material. Polypropylene fibers in most cases reduce density and compressive strength and increase water absorption; therefore, their use should be limited to small doses and mainly applied to improve crack resistance. The best complex of physical and mechanical properties is achieved when marble dust is used in combination with basalt fiber.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, basalt fiber, basalt fibers, polypropylene fibers, experimental-statistical modeling, strength of fiber-reinforced concrete, nomograms

ACKNOWLEDGMENTS: This research was carried out with the support of the Ministry of Science, Higher Education and Innovation of the Kyrgyz Republic. Registration No. 240032, 15.02.2024.

FOR CITATION:

Abdykalykov A., Aidaraliev Z.K., Abdykalyk kyzy Zh., Sopubekov N.A., Suiunbek uulu A. Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве широко применяются армированные бетонные материалы, что обусловлено недостатками обычного бетона, такими как низкая прочность на растяжение, низкая ударная стойкость и склонность к образованию усадочных трещин. Традиционно повышение прочностных характеристик бетона достигается использованием стальной арматуры или металлических сеток. В последние годы активно развивается технология дисперсного армирования бетонных матриц с применением различных волокон, включая стальные, стеклянные, базальтовые и полимерные волокна [1–7].

Дисперсное армирование способствует повышению трещиностойкости, пластичности и долговечности бетона, а также снижению массы конструкций. В отличие от традиционного армирования металлической сеткой, фиброволокна препятствуют образованию трещин на ранних стадиях твердения бетона, когда материал находится в пластическом состоянии [8–11].

Полимерные волокна, в частности полипропиленовые, широко применяются благодаря коррозионной стойкости и технологичности [12–15]. Однако их использование ограничивается сравнительно низкой адгезией к цементной матрице и снижением прочностных характеристик при длительной эксплуатации. Металлические волокна обладают высокой прочностью, однако подвержены коррозии и могут проявлять катодный эффект в агрессивных средах цементных растворов.

Стекловолокно также применяется для армирования цементных композитов, однако его долговечность во многом зависит от щелочной среды цементного камня. Установлено, что продукты гидратации портландцемента могут оказывать отрицательное воздействие на стекловолокно, тогда как использование глиноземистых цементов позволяет повысить его химическую стойкость [16].

Исследования показывают, что применение базальтовых и полимерных волокон позволяет значительно повысить морозостойкость, ударную вязкость и сопротивление трещинообразованию фибробетонов. Кроме того, использование дисперсного армирования способствует равномерному распределению напряжений в бетонной матрице и повышению долговечности конструкций [16–16]. Совместное применение различных минеральных наполнителей и фибры способствует повышению физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетонов [20–25].

Фибробетоны находят широкое применение в промышленном и гражданском строительстве, транспортной инфраструктуре и гидротехнических сооружениях. Их использование позволяет повысить

устойчивость конструкций к динамическим нагрузкам, температурным воздействиям и агрессивным средам. Однако более высокая стоимость фибробетонов по сравнению с традиционными бетонами остается одним из факторов, ограничивающих их широкое применение [26–35].

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что дисперсное армирование бетонов различными видами волокон является эффективным способом повышения их прочностных и эксплуатационных характеристик. Среди различных видов армирующих волокон особый интерес представляет базальтовое волокно, обладающее высокой прочностью, химической стойкостью и перспективами широкого применения в строительных композиционных материалах.

Целью исследований является оптимизация рецептурных факторов и свойств композиционного материала на цементном вяжущем с использованием мраморных наполнителей и дисперсного армирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении экспериментальных работ был проведен 5-ти-факторный эксперимент по плану H_{52} (табл. 2), где варьировалось 5 рецептурных факторов: X_1 – мраморная крошка (МК), %; X_2 – мраморный порошок (МП), %; X_3 – мраморная пыль (М-пыль), %; X_4 – фибры базальтовые (ФБ), %; X_5 – фибры полипропиленовые (ФП), %; **остальное – портландцемент**. Уровни варьирования 5-ти факторов представлены в таблице 1.

Показателями качества композиционного материала были выбраны: Y_1 – ($R_{сж}$). Прочность на сжатие, МПа; Y_2 – прочность на растяжение, %; Y_3 – водопоглощение; Y_4 – (ρ) плотность, кг/м³.

По результатам эксперимента методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты регрессии моделей выбранных свойств композиционного материала (1–6). Также были построены графические образы ЭС-моделей в виде двумерных номограмм (рис. 1–8).

Экспериментальные образцы изготавливались по следующей технологии: мраморные наполнители различной фракции, армирующие фибры и портландцемент перемешивали в сухом состоянии в течение 10 минут, после чего добавляли необходимое количество воды. Полученную смесь перемешивали в течение 30 минут и формовали в специальные формы для проведения испытаний. Через 24 часа образцы композитов подвергали обработке водяным паром в течение 30 минут. После трех суток выдерживания проводили испытания на плотность, водопоглощение и прочность.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Уровни факторов	Значение факторов				
	X ₁ МК, %	X ₂ МП, %	X ₃ М-пыль, %	X ₄ ФБ, %	X ₅ ФП, %
-1	20	5	4	0	0
0	25	10	8	2	2
1	30	15	12	4	4

Таблица 2. План эксперимента типа Na₅

№	Нормализованные переменные					Натуральные переменные					Свойства	
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	X ₁ -МК, %	X ₂ - МП, %	X ₃ - М- пыль, %	X ₄ - ФБ, %	X ₅ - ФП, %	Y ₁ - плотность, кг/м ³	Y ₂ - водопогло- щение, %
1	+	+	+	+	+	30	15	12	4	4	1270	27
2	-	-	+	+	+	20	5	12	4	4	1271	25,2
3	-	+	-	-	-	20	15	4	0	0	1544	17,4
4	+	-	-	-	-	30	5	4	4	4	1280	22,3
5	-	+	-	+	+	20	15	4	4	4	1330	14,7
6	+	-	-	+	+	30	5	4	4	4	1350	12,6
7	+	+	+	-	-	30	15	12	0	0	1940	9,3
8	-	-	+	-	-	20	5	12	0	0	1950	14,2
9	-	+	+	+	-	20	15	12	4	0	1480	15,4
10	+	-	+	+	-	30	5	12	4	0	1490	12
11	+	+	-	-	+	30	15	4	0	4	1470	20,4
12	-	-	-	-	+	20	5	4	0	4	1465	8
13	-	+	+	-	+	20	15	12	0	4	1615	9
14	+	-	+	-	+	30	5	12	0	4	1640	10,3
15	+	+	-	+	-	30	15	4	4	0	1590	10,5
16	-	-	-	+	-	20	5	4	4	0	1585	11,3
17	+	0	0	0	0	30	10	8	2	2	1760	11
18	-	0	0	0	0	20	10	8	2	2	1757	9,2
19	0	+	0	0	0	25	15	8	2	2	1689	12
20	0	-	0	0	0	25	5	8	2	2	1630	12,7
21	0	0	+	0	0	25	10	12	2	2	1645	13
22	0	0	-	0	0	25	10	4	2	2	1666	12
23	0	0	0	+	0	25	10	8	4	2	1488	11
24	0	0	0	-	0	25	10	8	0	2	1515	12
25	0	0	0	0	+	25	10	8	2	4	1576	12,7
26	0	0	0	0	0	25	10	8	2	2	1482	13,6
27	0	0	0	0	0	25	10	8	2	0	1564	12,7

Таблица 2. План эксперимента типа Na_5

№	Результаты эксперимента			
	Y_1 - плотность, кг/м ³	Y_2 - водопоглощение, %	Y_3 - прочность на сжатие, МПа	Y_4 - прочность на изгиб, МПа
1	1270	27	0,150	2,60
2	1271	25,2	0,145	2,66
3	1544	17,4	0,190	5,00
4	1280	22,3	0,800	5,11
5	1330	14,7	0,126	5,12
6	1350	12,6	0,140	9,37
7	1940	9,3	0,142	1,875
8	1950	14,2	0,996	2,093
9	1480	15,4	0,936	8,43
10	1490	12	10,110	5,625
11	1470	20,4	0,950	4,30???
12	1270	8	1,110	5,620
13	1615	9	1,360	7,370
14	1640	10,3	1,620	1,775
15	1590	10,5	2,061	1,357
16	1585	11,3	1,312	0,130
17	1760	11,0	9,372	0,040
18	1757	9,2	1,52	0,140
19	1689	12	2,610	0,110
20	1630	12,7	2,322	0,092
21	1645	13	8,123	0,012
22	1666	12	7,971	0,011
23	1488	11	1,560	0,012
24	1515	12	0,821	0,026
25	1576	12,7	1,08	0,034
26	1482	13,6	1,310	0,050
27	1564	12,7	1,920	0,007

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1637,03 - 28,67 x_1 + \\
 & + 32,0 x_2 + 73,8 \cdot x_3 - 75,5 x_4 - 68,39 x_5 + \\
 & + 102,09 \cdot x_1^2 + 3,09 \cdot x_2^2 - 0,91 \cdot x_3^2 - \\
 & - 154,91 x_4^2 - 86,41 \cdot x_5^2 + 70,07 x_1 x_2 + \\
 & + 35,44 \cdot x_1 x_3 + 30,19 \cdot x_1 x_4 + 32,06 \cdot x_1 x_5 - \\
 & - 38,07 x_2 x_3 - 29,06 \cdot x_2 x_4 - 30,94 \cdot x_2 x_5 - \\
 & - 120,94 \cdot x_3 x_4 - 55,31 x_3 x_5 - 44,32 x_4 x_5. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Анализ влияния факторов

По коэффициентам и числовым расчетам установлено:

Увеличение плотности обеспечивает:

- повышение содержания мраморной пыли (X_3) – наиболее сильное влияние;
- уменьшение базальтовой (X_4) и полипропиленовой (X_5) фибры;
- взаимодействие $X_1 X_2$ положительно влияет на плотность;
- отрицательные взаимодействия ($X_3 X_4$, $X_3 X_5$, $X_4 X_5$) свидетельствуют о том, что при одновременном росте наполнителя и фибр образуется более пористая структура.

Квадратичные члены показывают оптимум:

- x_1^2 увеличивает плотность → оптимум вблизи верхней границы мраморной крошки,
- x_4^2 и x_5^2 уменьшают плотность → увеличение армирования выше определенного уровня приводит к дефектности структуры.

Практическое значение модели:

1. Модель позволяет прогнозировать плотность во всем диапазоне рецептур.

2. Обеспечивает поиск оптимального состава методом частных производных, поверхности отклика, функции желательности Харрингтона.

3. Позволяет исключить материалы, ухудшающие свойства при определенных комбинациях.

4. Дает возможность проектировать составы без проведения полного цикла испытаний.

После реализации эксперимента и расчета коэффициентов регрессии моделей свойств КМ (композиционного материала) их анализ проводился для двух типов КМ:

1. Композиционный материал на модифицированном цементном вяжущем и фибре базальтовой (КМ_Б) (Фибра полипропиленовая – 0%).

2. Композиционный материал на модифицированном цементном вяжущем и фибре полипропиленовой (КМ_П) (фибра базальтовая – 0%)

На основе полученной ЭС-модели (1) свойств композиционного материала путем подстановки факторов x_4 и $x_5 = -1$ были получены модели свойств двух разных цементных композиций: для КМ_Б при ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$) и КМ_П при ($x_4 = -1$, $X_4 = 0\%$).

КМ_Б ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$)

5-ти факторная модель Y_1 преобразована в 4-х факторную $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1619,01 - 60,73 x_1 + \\
 & + 62,94 x_2 + 129,11 x_3 - 31,18 x_4 + \\
 & + 102,09 \cdot x_1^2 + 3,09 \cdot x_2^2 - 0,91 \cdot x_3^2 - \\
 & - 154,91 x_4^2 + 70,07 x_1 x_2 + 35,44 \cdot x_1 x_3 + \\
 & + 30,19 \cdot x_1 x_4 - 38,07 x_2 x_3 - 29,06 \cdot x_2 x_4 - \\
 & - 120,94 \cdot x_3 x_4 \quad (2)
 \end{aligned}$$

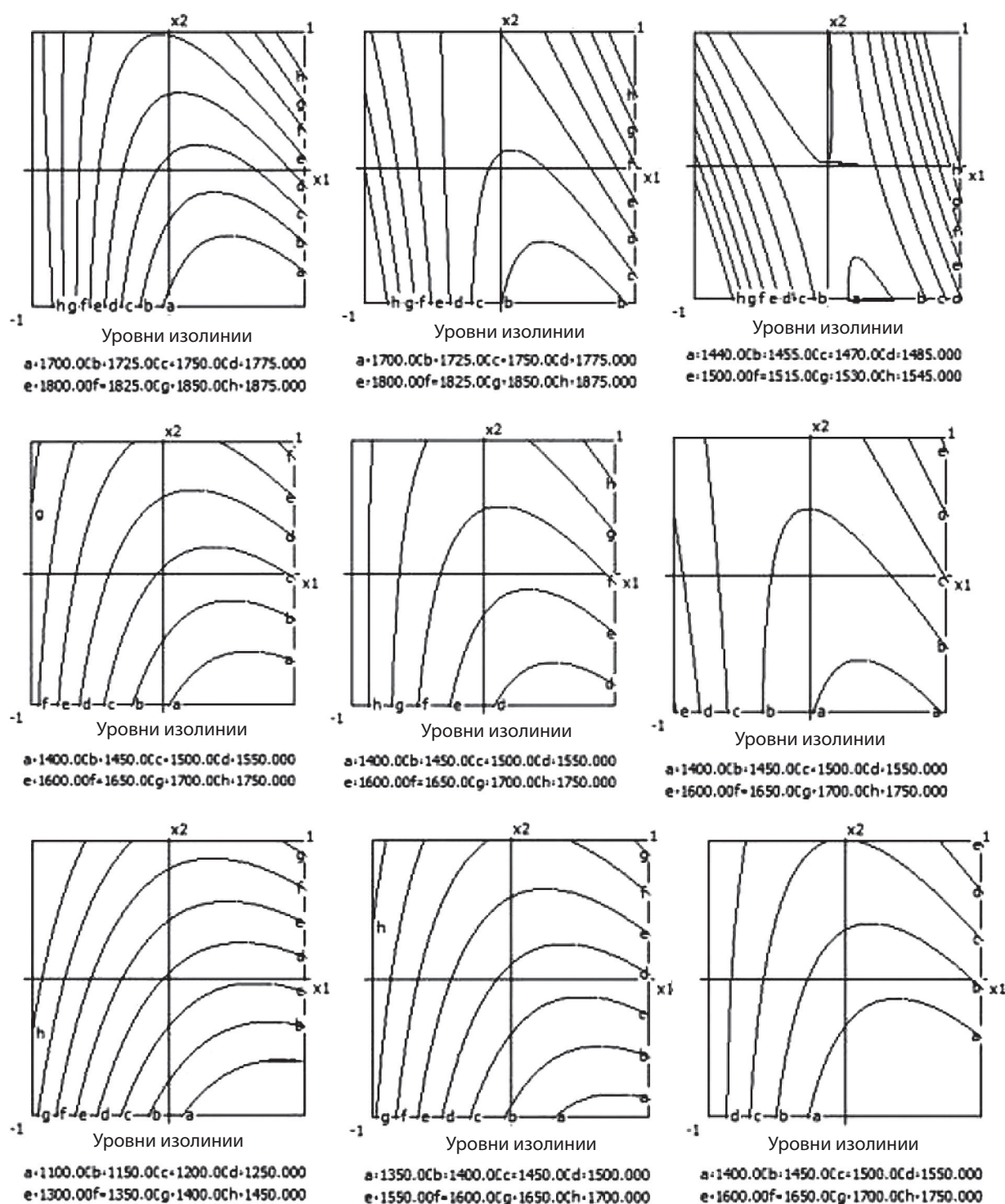


Рис. 1. Область рецептов композиционного материала $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

КМ_П ($x_4 = -1, X_4 = 0\%$).

5-ти факторная модель Y_1 преобразована в 4-х факторную $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при условии $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1557,62 - 58,86 x_1 + \\
 & + 61,06 x_2 + 194,74 x_3 - 24,07 x_5 + \\
 & + 102,09 x_1^2 + 3,09 x_2^2 - 0,91 x_3^2 - 86,41 x_5^2 + \\
 & + 70,07 x_1 x_2 + 35,44 x_1 x_3 + 32,06 x_1 x_5 - \\
 & - 38,07 x_2 x_3 - 30,94 x_2 x_5 - 55,31 x_3 x_5
 \end{aligned} \quad (3)$$

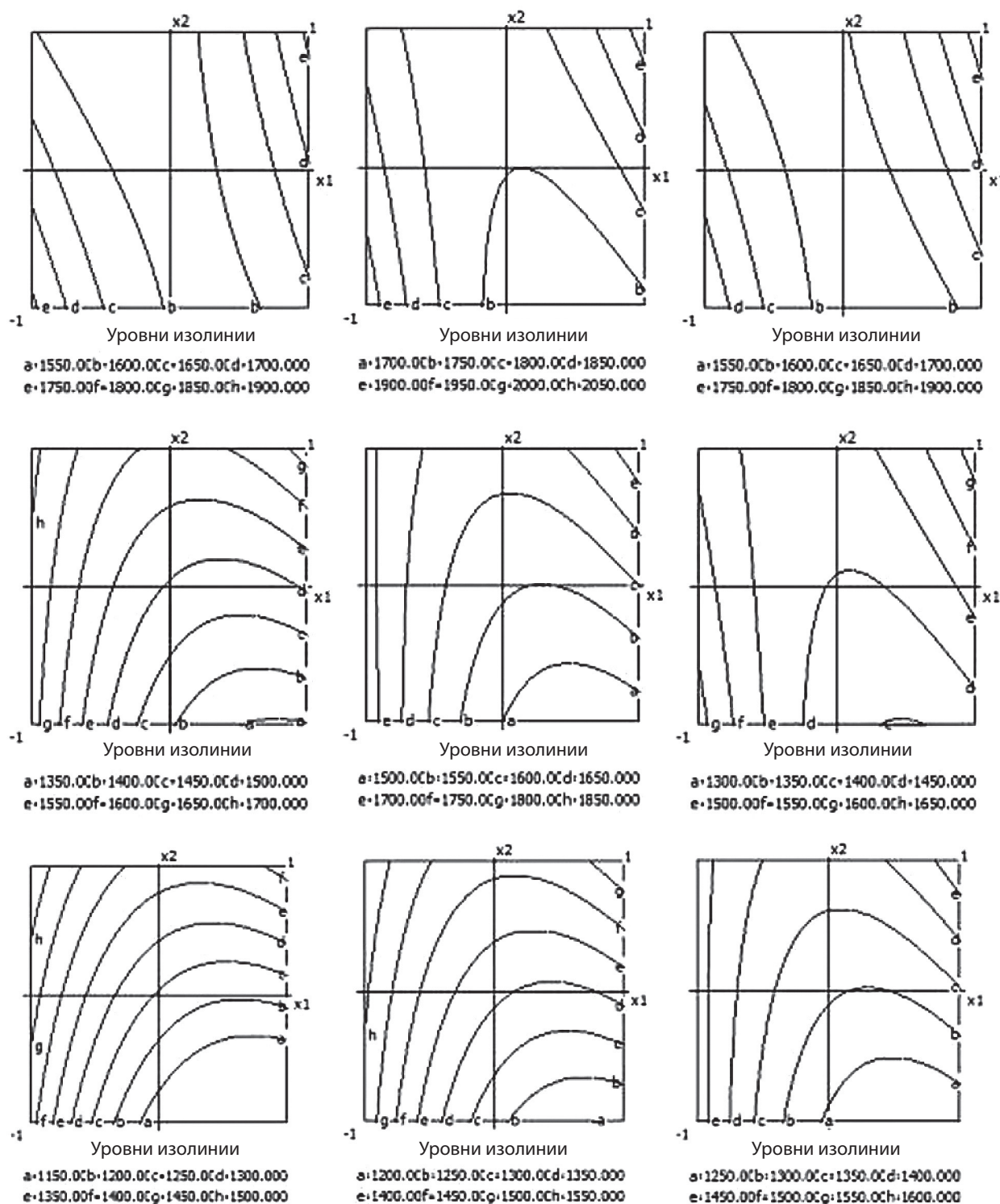


Рис. 2. Область рецептов композиционного материала $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

По результатам пятифакторного эксперимента типа Na_3 была получена квадратичная регрессионная модель плотности композиционного материала (уравнение 1), учитывающая линейные, квадратичные и попарные взаимодействия факторов.

Анализ коэффициентов регрессии показывает, что наибольшее влияние на плотность оказывает содержание мраморной пыли (X_3), а также количество базальтовых (X_4) и полипропиленовых (X_5) фибр.

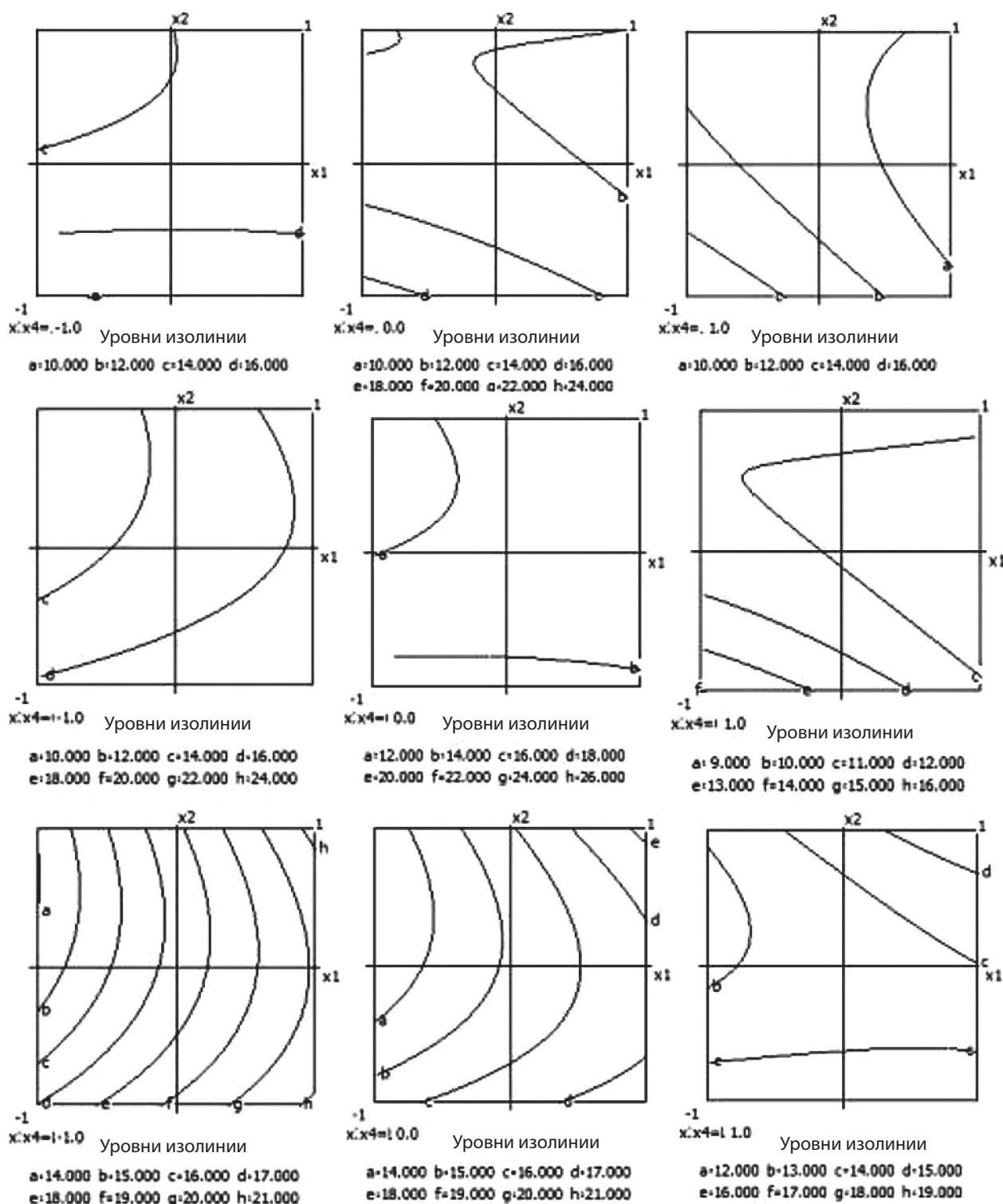


Рис. 3. Водопоглощение композиционного материала $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

Положительный коэффициент при факторе X_3 свидетельствует о том, что увеличение доли мраморной пыли способствует повышению плотности композиционного материала. Это объясняется улуч-

шением гранулометрического состава смеси и более плотной упаковкой частиц цементной матрицы.

В противоположность этому увеличение содержания базальтовых и полипропиленовых фибр (X_4

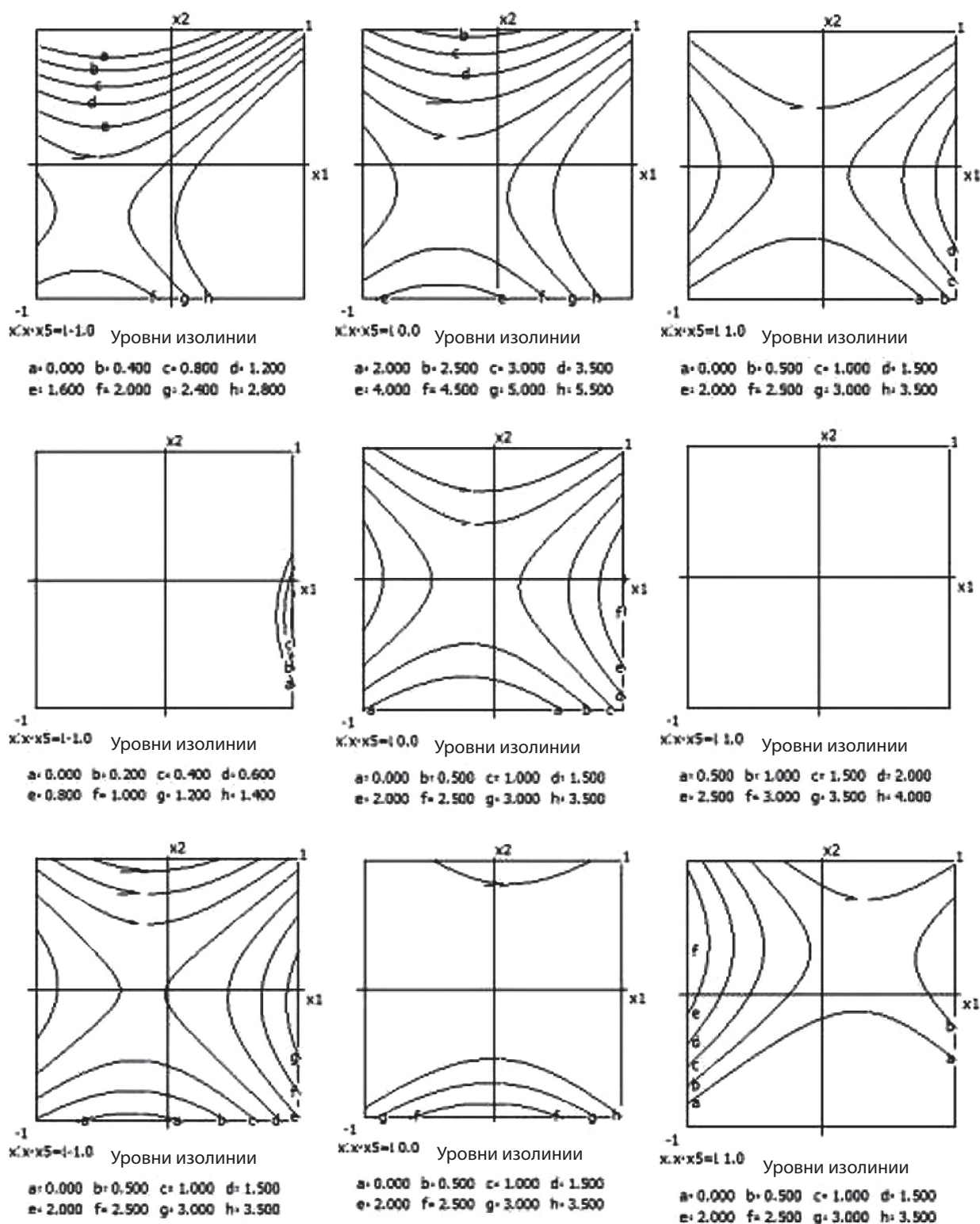


Рис. 4. Водопоглощение композиционного материала $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

и X_5) приводит к снижению плотности. Данный эффект обусловлен тем, что введение волокон ухудшает уплотнение смеси и способствует образованию дополнительной пористости вследствие формиро-

вания межфазных зон «волокно – цементная матрица».

Квадратичные коэффициенты при факторах X_4^2 и X_5^2 имеют отрицательные значения, что указыва-

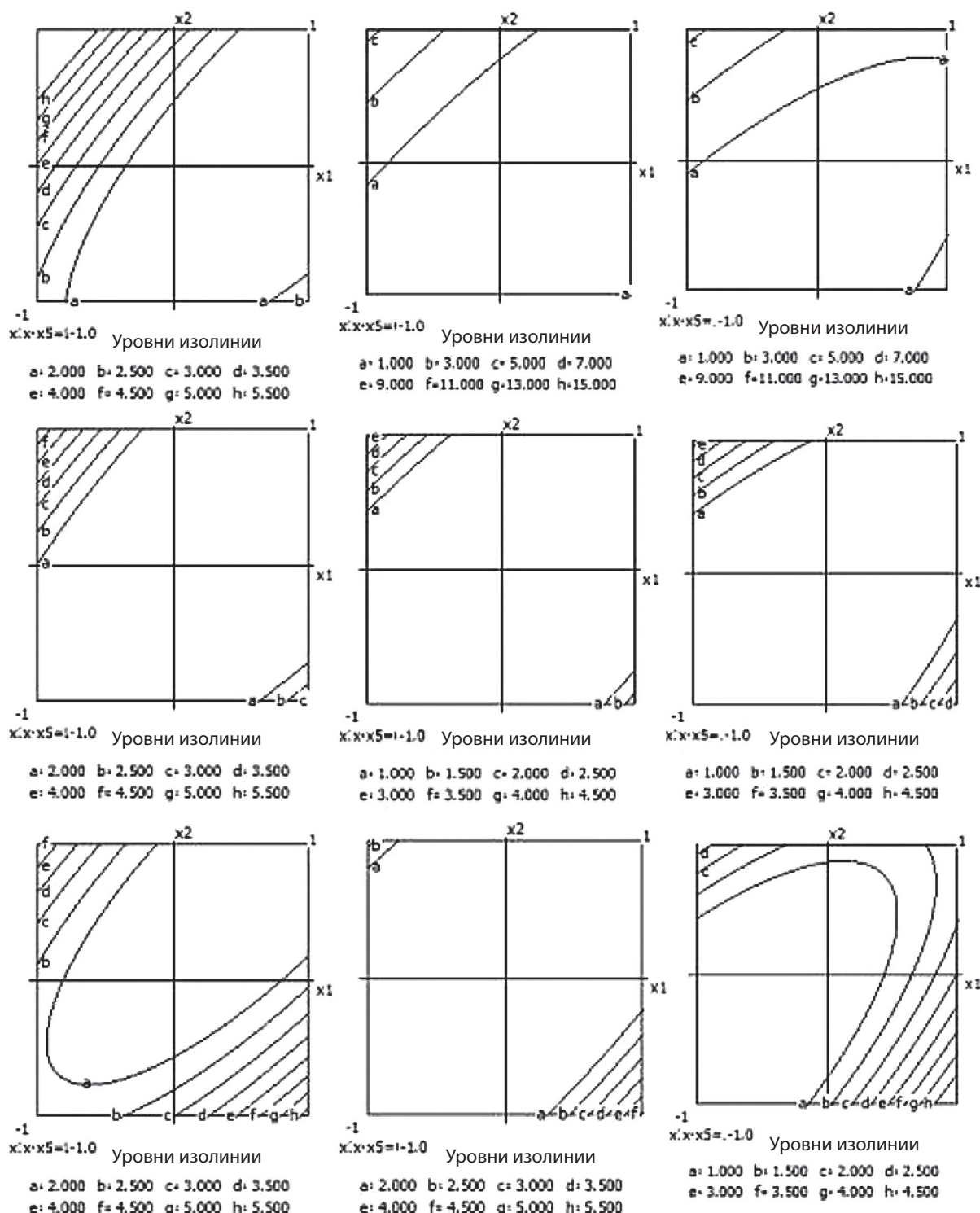


Рис. 5. Прочность на сжатие композиционного материала $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

ет на наличие оптимального интервала содержания фибр. При превышении определенной концентрации волокон происходит ухудшение структуры материала и снижение плотности вследствие образования дефектов и локальных пустот.

Существенное влияние оказывают и межфакторные взаимодействия. В частности, отрицательные коэффициенты взаимодействий X_3X_4 и X_3X_5 свидетельствуют о том, что при одновременном увеличении содержания мраморной пыли и фибр наблюда-

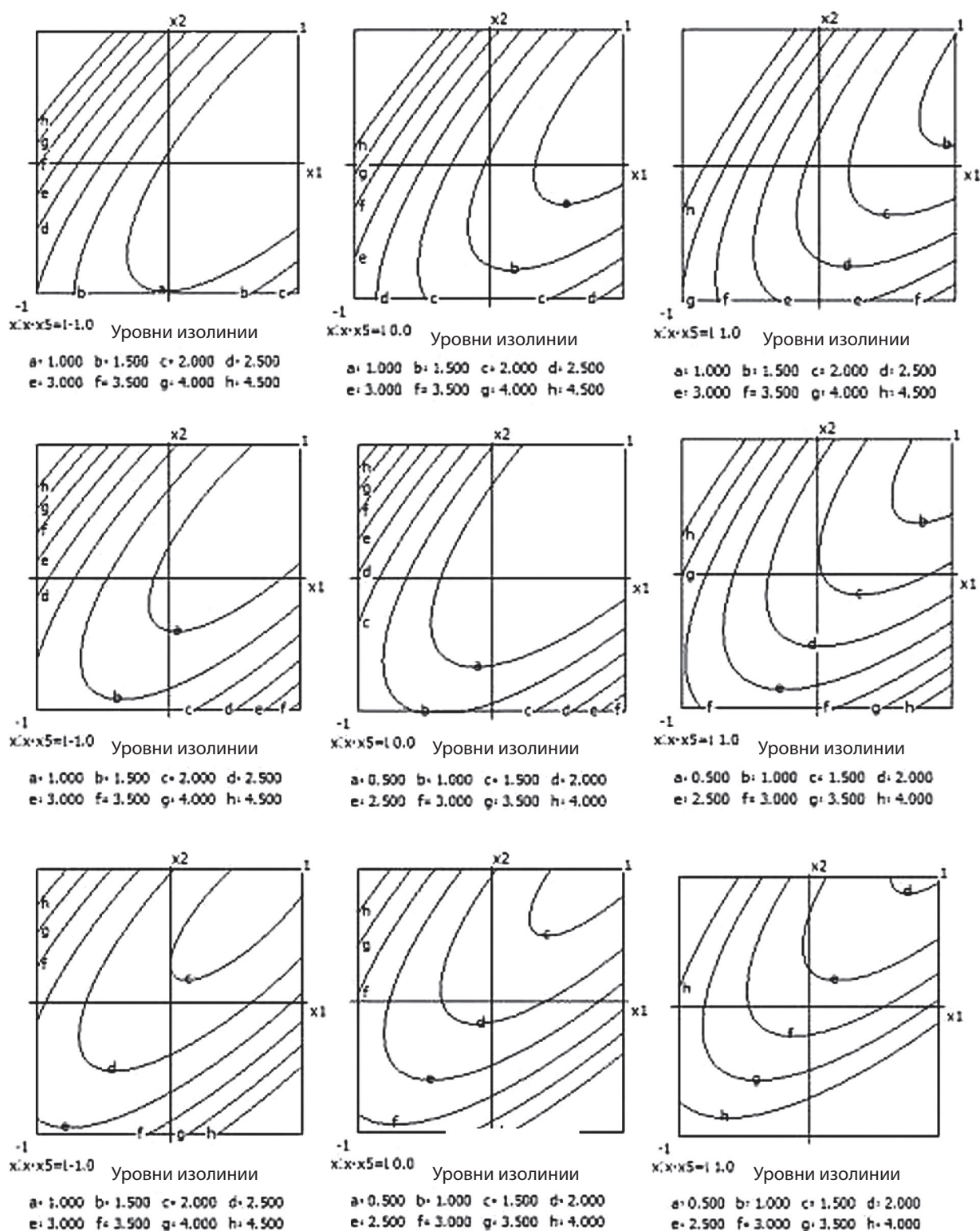


Рис. 6. Прочность на сжатие композиционного материала $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

ется снижение плотности материала. Это связано с тем, что избыток мелкодисперсного наполнителя в присутствии волокон ухудшает условия уплотнения и формирует более развитую пористую структуру.

Таким образом, полученная модель позволяет количественно оценить влияние рецептурных факторов на плотность композиционного материала и определить оптимальные области состава.

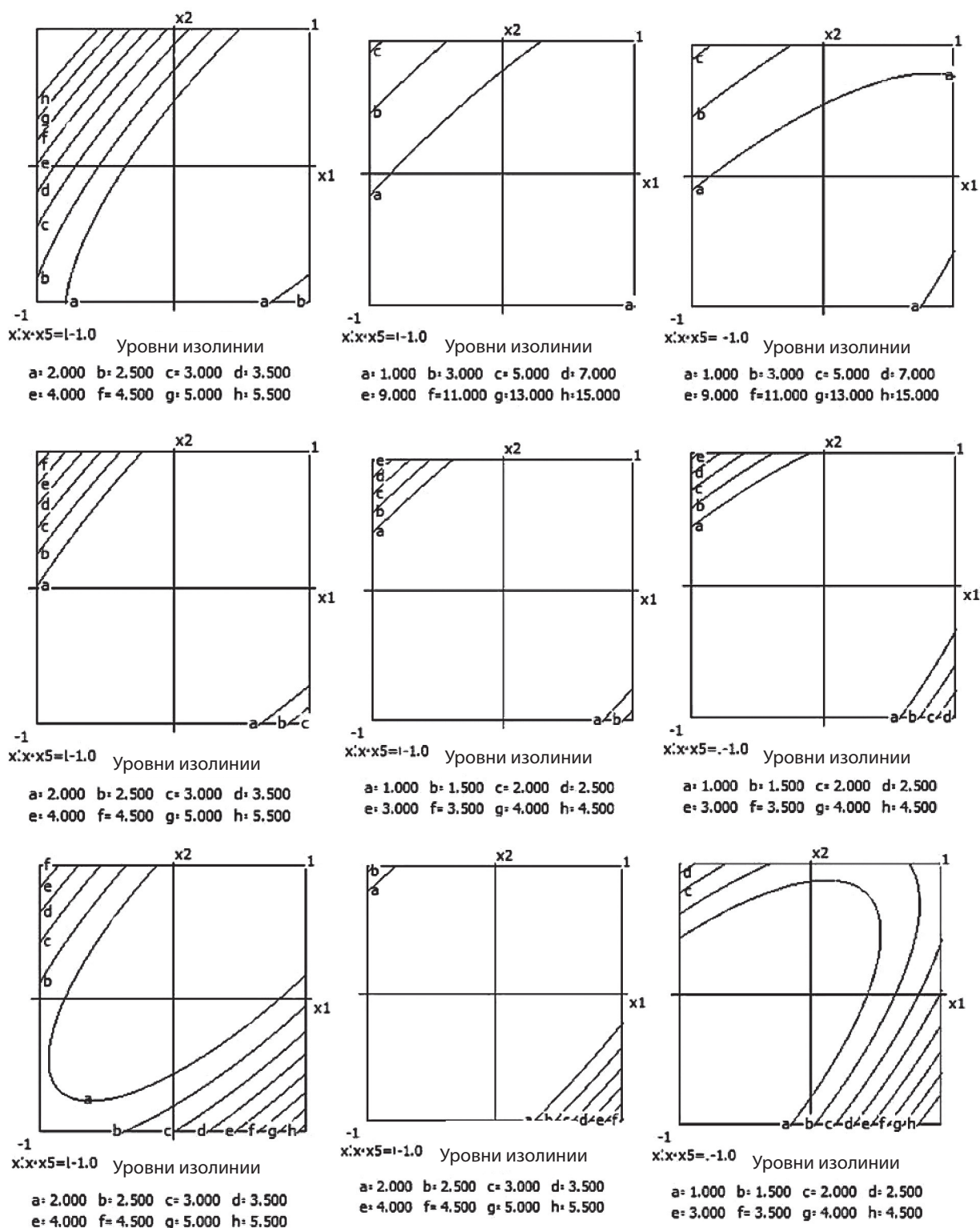


Рис. 7. Прочность на изгиб композиционного материала $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без фибры полипропиленовой = 0%)

Наличие фибр (и особенно их увеличение) приводит к уменьшению плотности материала. Это объясняется увеличением внутренней пористости при введении волокон (возникновение локальных пу-

стот, ухудшение уплотнения при вибрации/укладке), а также тем, что фибры сами по себе занимают объем и формируют нерегулярную структуру матрицы.

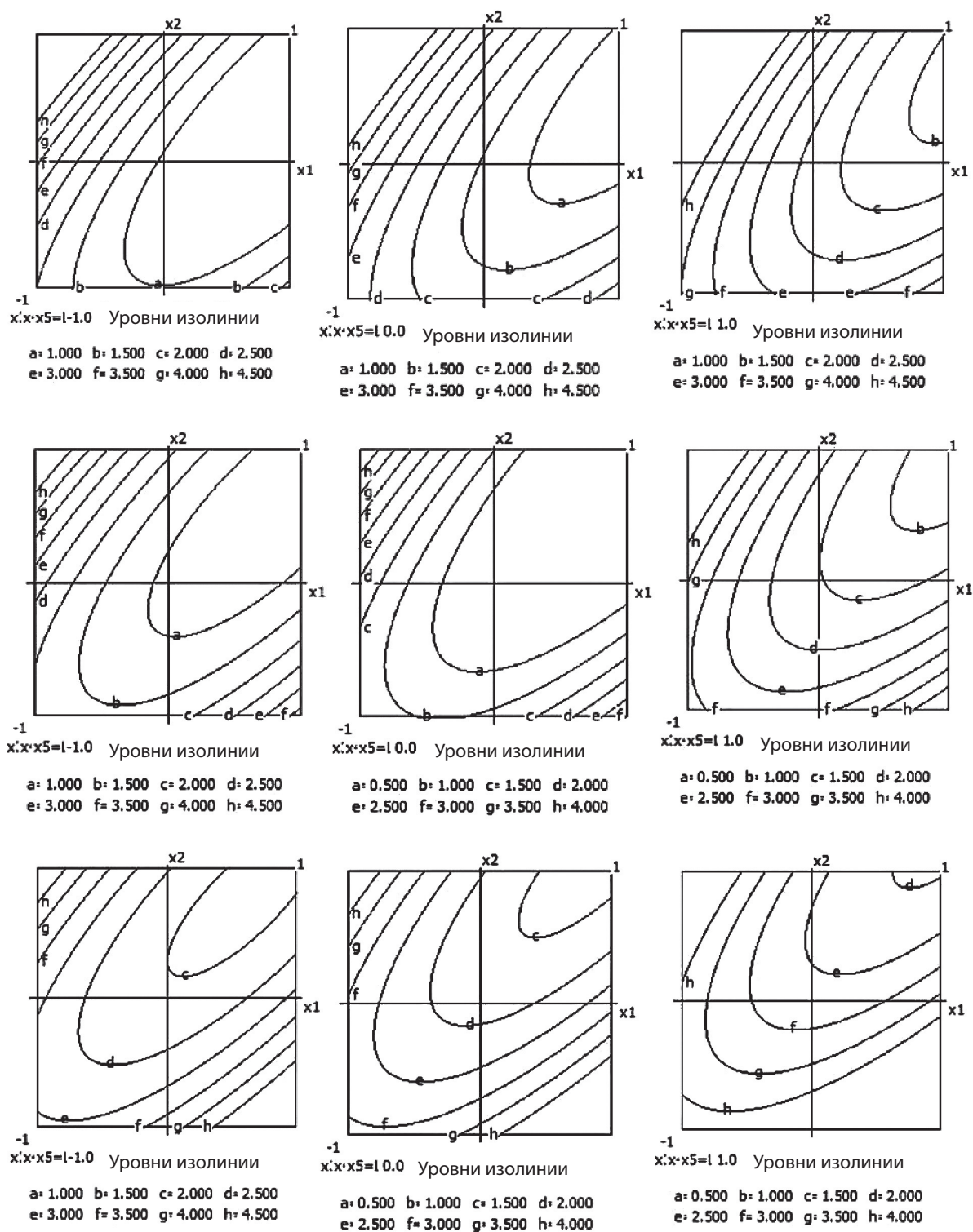


Рис. 8. Прочность на изгиб композиционного материала $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз 0%)

Квадратичные отрицательные члены (x_4^2, x_5^2) указывают на нелинейный эффект: при малых дозах влияние на плотность невелико, при больших — эффект резко усиливается (пороговое ухудшение уплотнения).

Анализ коэффициентов показывает:

- Плотность существенно повышает фактор X_3 — мраморная пыль.
- Наибольшее снижение плотности дают фибры X_4 и X_5 (отрицательные коэффициенты).

- Сильные взаимодействия X_3X_4 , X_3X_5 , X_4X_5 указывают на то, что волокна уменьшают уплотнение при избытке мелкого дисперсного компонента. Основные закономерности:
- Увеличение мраморной пыли X_3 снижает водопоглощение (отрицательные коэффициенты).
- Волокна, наоборот, повышают Y_2 (коэффициенты X_4 , $X_5 > 0$).
- Влияние взаимодействий X_1X_3 , X_1X_4 , X_2X_5 указывает на комбинированные механизмы порообразования.

Волокна увеличивают водопоглощение: механизм – волокна создают дополнительные капиллярные пути и локальные дефекты межфазной зоны «волокно–матрица», что повышает проницаемость.

Положительные взаимодействия (особенно x_3x_4) означают, что сочетание мелкодисперсной пыли и волокон иногда усиливает водоудерживающие каналы (возможно, из-за формирования тонкопористой структуры вокруг волокон).

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 11,369 + 0,611 x_1 + 0,394 x_2 - 0,344 x_3 + 0,933 x_4 + 0,772 x_5 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 0,297 x_4^2 + 1,947 x_5^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 - 1,137 x_1 x_4 + 1,10 x_1 x_5 - 0,612 x_2 x_3 + 0,325 x_2 x_4 + 1,387 x_2 x_5 + 3,487 x_3 x_4 + 1,65 x_3 x_5 + 2,862 x_4 x_5. \quad (4)$$

$Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

Формула 4-х факторной модели $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$.

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 12,544 + 0,489 x_1 - 0,993 x_2 - 1,306 x_3 - 1,929 x_4 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 0,297 x_4^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 - 1,137 x_1 x_4 + -0,612 x_2 x_3 + 0,325 x_2 x_4 + 3,487 x_3 x_4. \quad (5)$$

Формула 4-х факторной модели $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 10,733 + 1,748 x_1 + 0,069 x_2 - 3,143 x_3 + -2,09 x_5 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 1,947 x_5^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 + 1,10 x_1 x_5 - 0,612 x_2 x_3 + 1,387 x_2 x_5 + 1,65 x_3 x_5. \quad (6)$$

Регрессионная модель водопоглощения (уравнение 3) показывает, что на данное свойство значительное влияние оказывает содержание мраморной пыли и армирующих волокон.

Отрицательный коэффициент при факторе X_3 указывает на то, что увеличение содержания мраморной пыли приводит к снижению водопоглощения.

Это объясняется уплотнением структуры материала и уменьшением объема открытых капиллярных пор.

В то же время увеличение содержания фибр (X_4 и X_5) сопровождается ростом водопоглощения. Причиной этого является формирование дополнительных капиллярных каналов и межфазных дефектов в зоне контакта «волокно – цементная матрица», что повышает проницаемость материала для воды.

Значительные коэффициенты при взаимодействиях X_3X_4 и X_3X_5 свидетельствуют о том, что влияние волокон на водопоглощение зависит от содержания мелкодисперсного наполнителя. При высоком содержании мраморной пыли формируется тонкопористая структура вокруг волокон, что может усиливать капиллярный перенос влаги.

Таким образом, минимизация водопоглощения достигается при повышенном содержании мраморной пыли и ограниченном количестве армирующих волокон.

$$Y_3 \text{ (Прочность на сжатие, МПа)} = 3,92 + 0,981 x_1 - 0,557 x_2 + 0,497 x_3 + 0,475 x_4 - 0,621 x_5 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,979 x_4^2 - 2,975 x_5^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + 0,63 x_1 x_4 - 0,597 x_1 x_5 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + 0,591 x_2 x_5 + 0,412 x_3 x_4 - 0,429 x_3 x_5 - 1,048 x_4 x_5.$$

5-ти факторная модель Y_3 преобразована в 4-х факторную $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$Y_3 = 1,566 + 1,578 x_1 - 1,148 x_2 + 0,925 x_3 + 1,523 x_4 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,979 x_4^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + 0,63 x_1 x_4 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + 0,415 x_3 x_4. \quad (7)$$

Полученная регрессионная модель прочности на сжатие (уравнение 6) показывает сложный характер влияния рецептурных факторов на прочностные характеристики композиционного материала.

Наибольшее положительное влияние на прочность оказывает мраморная пыль (X_3), что подтверждается значительным положительным квадратичным коэффициентом. Мелкодисперсные частицы мрамора выполняют роль микрозаполнителя, способствуя уплотнению цементной матрицы и формированию более прочной структуры.

Базальтовые фибры (X_4) оказывают положительное влияние на прочность на сжатие. Это объясняется их армирующим эффектом: волокна препятствуют распространению микротрещин и обеспечивают перераспределение напряжений в структуре композита.

Полипропиленовые фибры (X_5), напротив, оказывают менее благоприятное влияние на прочность. Вероятной причиной является относительно слабая адгезия полипропиленовых волокон к минеральной матрице, что может приводить к образованию локальных дефектов и снижению несущей способности материала.

Отрицательные квадратичные коэффициенты при X_4^2 и X_5^2 свидетельствуют о том, что чрезмерное содержание волокон приводит к снижению прочности. Это подтверждает существование оптимального интервала армирования.

Формула 4-х факторной модели $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%).

$$Y_3 = 0,466 + 0,351 x_1 - 0,148 x_2 + 0,081 x_3 + 0,427 x_5 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,975 x_5^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 - 0,591 x_1 x_5 - 0,64 x_2 x_3 + 0,591 x_2 x_5 - 0,429 x_3 x_5.$$

$$Y_4 \text{ (Прочность на изгиб, МПа)} = -0,862 - 0,251 x_1 + 0,205 x_2 - 0,199 x_3 + 0,119 x_4 = 0,51 x_5 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 0,99 x_4^2 + 1,013 x_5^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 + 0,602 x_1 x_4 - 0,065 x_1 x_5 + 0,786 x_2 x_3 - 0,264 x_2 x_4 - 0,234 x_2 x_5 + 0,641 x_3 x_4 - 1,027 x_3 x_5 - 0,049 x_4 x_5.$$

5-ти факторная модель Y_4 преобразована в 4-х факторную $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при условии $X_4 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -0,359 - 0,186 x_1 + 0,439 x_2 + 0,828 x_3 + 0,168 x_4 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 0,99 x_4^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 + 0,602 x_1 x_4 + 0,786 x_2 x_3 - 0,264 x_2 x_4 + 0,641 x_3 x_4.$$

Формула 4-х факторной модели $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

$$Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5) = 0,009 - 0,853 x_1 + 0,469 x_2 - 0,84 x_3 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 1,013 x_5^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 - 0,065 x_1 x_5 + 0,786 x_2 x_3 - 0,234 x_2 x_5 - 1,027 x_3 x_5.$$

Анализ модели прочности на изгиб показывает, что данное свойство в значительной степени определяется составом минерального наполнителя и типом армирующих волокон.

Положительное влияние на прочность при изгибе оказывают мраморный порошок (X_2) и мраморная пыль (X_3), которые способствуют формированию более плотной и однородной структуры цементной матрицы.

Наиболее выраженное положительное влияние среди армирующих компонентов оказывает базальтовая фибра (X_4). Высокая прочность и модуль упругости базальтовых волокон обеспечивают эффективное восприятие растягивающих напряжений, возникающих при изгибе, и препятствуют развитию трещин.

Полипропиленовые фибры оказывают менее выраженное влияние на изгибную прочность. Их основная функция заключается в повышении трещиностойкости и ограничении раскрытия микротрещин, однако их вклад в повышение предельной прочности материала сравнительно невелик.

Оптимальная область рецептурных параметров соответствует следующим значениям факторов: мраморная крошка – 25÷30%; мраморный порошок – 10÷15%; мраморная пыль – около 12%; базальтовая фибра – 2÷4%; полипропиленовая фибра × не более 1÷2%.

В указанной области обеспечивается наиболее благоприятное сочетание плотности, прочности и водопоглощения композиционного материала.

Для требующих низкого водопоглощения составы с фибрами нуждаются в дополнительной оптимизации: уменьшить X_4/X_5 , увеличить долю пыли X_3 (для лучшей упаковки), использовать суперпластификатор или гидрофобизирующую добавку.

Полипропиленовые фибры увеличивают водопоглощение почти так же, как базальтовые — поэтому их применение следует ограничивать, если целью является минимизация влажности.

В полной модели коэффициент при x_4 положительный (+0,475), при x_5 — отрицательный (−0,621). В 4-факторном сечении при $X_5 = -1$ базальтовая фибра дает значительное положительное влияние (в сечении X_4 коэффициент +1,523).

Построенные двумерные номограммы (рис. 1–8) наглядно отображают влияние исследуемых факторов на свойства композиционного материала и позволяют определить оптимальные области рецептурных параметров.

Анализ номограмм показывает, что максимальные значения прочности и минимальные значения водопоглощения достигаются при повышенном содержании мраморной пыли и умеренном количестве базальтовых фибр.

Квадратичные взаимодействия: сильный положительный квадратичный член x_3^2 (мраморная пыль) и отрицательный квадратичный член x_4^2 (в 5-факторной модели было $-2,979 \cdot x_4^2$ в одной формуле) показывают, что польза от фибр имеет максимум при средней дозе.

Выявлено: мраморная пыль X_3 оказывает наибольшее положительное влияние на прочность (крупный положительный квадратичный коэффициент); базальтовая фибра X_4 увеличивает прочность,

а полипропиленовая X_5 — снижает (в полной модели); наибольшее ослабление идет через взаимодействие X_4X_5 → конкуренция армирующих фаз.

Анализ регрессионных моделей показывает, что базальтовые фибры (X_4) и полипропиленовые фибры (X_5) по-разному влияют на ключевые свойства фибробетона. Базальтовая фибра усиливает прочностные характеристики (особенно прочность на сжатие и изгиб) при умеренных дозах, но снижает плотность и при передозировке повышает водопоглощение. Полипропиленовая фибра чаще оказывает отрицательное влияние на плотность и прочность на сжатие и увеличивает водопоглощение; ее целесообразно применять в малых дозах или вовсе исключать в задачах, где важна плотность и прочность.

Базальтовая фибра улучшает прочность на сжатие за счет армирующего эффекта — она препятствует формированию и раскрытию трещин, передает и перераспределяет напряжения в матрице.

Полипропиленовая фибра в наших данных уменьшает прочность на сжатие; вероятные причины — слабая адгезия ПП к минералу, матрице, образование пустот вокруг волокон или ухудшение технологичности укладки (плохое уплотнение).

Для увеличения прочности на сжатие предпочтительна базальтовая фибра в умеренных дозах ($X_4 = 2 \div 4\%$).

Избегать или минимизировать полипропиленовую фибру необходимо, если приоритет — прочность на сжатие; альтернативно улучшать адгезию (обработка поверхности волокон, добавки -сурфактанты).

Модель Y4 показывает положительный вклад X_4 (приблизительно +0,119...+0,168 в разных сечениях) и нулевой/слабый эффект X_5 (в некоторых вариантах коэффициент около +0,51· x_5 , но общая картина — зависимость сложная с сильными квадратичными и межфакторными членами).

Закономерности:

- прочность возрастает при увеличении X_2 и X_3 ;
- фибры по-разному влияют: базальтовые X_4 повышают изгиб, ПП-фибра снижает в вариантах без X_4 ;
- значимые взаимодействия X_1X_2 , X_2X_3 , X_3X_4 определяют формирование каркаса.

Базальтовая фибра дает прирост прочности на изгиб за счет упрочнения межфазной зоны и перераспределения растягивающих напряжений.

Полипропиленовая фибра умеренно влияет на изгибовую прочность (в ряде моделей положительно, в ряде — нейтрально), т.к. ПП хорошо работает на контролируемое трещинообразование (улучшает трещиностойкость), но не придает большого упрочнения на сжатие или изгиб при слабой адгезии.

Для улучшения изгибовой прочности необходимо применять базальтовые фибры; оптимум — средние дозы ($\approx 2-3\%$).

Если задача — повысить остаточную трещиностойкость при небольшом снижении прочности, можно использовать малые дозы ПП вместе с базальтовыми фибрами, однако это требует дополнительной валидации.

Сильные попарные взаимодействия, выявленные в моделях (в частности $x_3 \cdot x_4$, $x_3 \cdot x_5$, $x_4 \cdot x_5$), свидетельствуют о том, что эффект фибр зависит от состава минерального наполнителя. Например, при высоком содержании мраморной пыли усиление от базальта может быть меньше или, наоборот, зависеть от уплотнения матрицы.

Квадратичные члены x_4^2 и x_5^2 говорят о существовании оптимального интервала доз фибр — «чрезмерное» армирование ухудшает свойства.

Базальтовая фибра (X_4):

- Рекомендуемая рабочая доза: $\approx 2-3\%$ (в пределах нашего ряда: $2\% =$ уровень 0; $4\% = +1$);
- Применять для повышения прочности на сжатие и изгиб; при этом контролировать уплотнение смеси;
- При дозах $>4\%$ необходима корректировка методики уплотнения (вибрация, суперпластификаторы) и проверка на увеличение пористости.

Полипропиленовая фибра (X_5):

- Приоритеты: если цель — снижение трещинообразования и повышение ударной/деформационной прочности, можно использовать малые дозы $0,5-2\%$; если цель — плотность и компрессия, лучше исключить (0%);
- При использовании ПП-фибры рекомендуется улучшать адгезию (модификация поверхности волокон, применение связующих добавок).

Комбинация армирующих фибр:

- Комбинированное армирование (базальт + ПП) возможно, но требует оптимизации: часто оптимальная схема — основная нагрузка на базальтовые фибры ($2-3\%$), ПП — в малой доле ($\leq 1-2\%$) для контроля трещинообразования;
- Оптимальным считается состав, обеспечивающий минимальное водопоглощение; максимальную прочность на сжатие (Y_3) и изгиб (Y_4), рациональную плотность, при этом соблюдается технологичность смеси.

По графическим областям и анализу производных максимизации был установлен оптимальный диапазон компонентов:

- X_1 (мраморная крошка): $0 \dots +1$ ($25-30\%$);
- X_2 (мраморный порошок): $0 \dots +1$ ($10-15\%$);
- X_3 (мраморная пыль): $+1$ (12%) — основной упрочняющий компонент;
- X_4 (фибры базальтовые): $0 \dots +1$ ($2-4\%$);
- X_5 (ПП-фибра): -1 (0%) или максимум $1-2\%$.

Проведенный 5-факторный эксперимент типа $Na5$ позволил построить адекватную квадратич-

ную математическую модель плотности композиционного материала, учитывающую линейные, квадратичные и попарные взаимодействия факторов. Анализ значимости коэффициентов показал, что наибольшее влияние оказывают содержание мраморной пыли, базальтовой и полипропиленовой фибры, а также взаимодействия между ними. На основе модели сформированы 4-факторные сечения рецептурной области при исключении отдельных видов фибры, что позволило определить оптимальные области составов для получения минимального водопоглощения и максимальной плотности.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Базальтовые фибры – эффективный инструмент для повышения прочностных характеристик

фибробетона при умеренных дозах ($\approx 2\text{--}3\%$), но ухудшают плотность и повышают водопоглощение при передозировке.

2. Полипропиленовые фибры в наших моделях чаще ухудшают плотность и прочность на сжатие и повышают водопоглощение; их применение целесообразно ограничивать малыми дозами и лишь при необходимости повышения трещиностойкости.

3. Существуют четкие нелинейные зависимости и взаимодействия с наполнителями (в частности, с мраморной пылью X_3), поэтому оптимизация состава должна выполняться многокритериально и с последующей экспериментальной валидацией.

4. Наилучший комплекс свойств достигается при использовании мраморной пыли и базальтовой фибры. Полипропиленовая фибра в большинстве случаев ухудшает свойства и должна применяться ограниченно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Ормонбеков Т.О. Техника и технология производства базальтовых волокон. Бишкек: Илим; 2005;152.
- 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
- Пашенко А.А., Сербин В.П., Пасловская А.П. Армирование неорганических веществ минеральными волокнами. М.: Стройиздат; 1988;201.
- Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Выбор видов волокон для дисперсного армирования изделий из центрифугированного бетона. *Науковедение*. 2017;9(4):1–10. EDN: ZIGGJP
- Жуков А.Д., Рудницкая В.А., Смирнова Т.В. Армирующие волокна в технологии бетонов. *Вестник МГСУ*. 2012;4:160–164. EDN: PAVGRZ
- Гурьева В.А., Белова Т.К. Технология приготовления цементных растворов, дисперсно армированных модифицированной микрофиброй. *Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура*. 2016;16(1):41–45. <https://doi.org/10.14529/build160106> EDN: VNXQSN
- Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012;4:58–61. EDN: PKRWCD
- Кнотько А.Б., Меледин А.А., Судьин В.В., Гаршев А.В., Пуляев В.И. Модификация поверхностного слоя базальтового волокна для увеличения коррозионной стойкости в фиброцементных композитах. *Строительные материалы*. 2010;9:89–93. EDN: NBIJAD
- Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Савгир Н.Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;2:63–66. EDN: PVMBSR
- Павлова И.П., Беломесова К.Ю. Стойкость базальтового фиброволокна в щелочной среде гидратирующих цементных систем. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F*. 2022;8:81–88. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-31-8-81-88> EDN: HLUAPR
- Кондрашов Г.М., Гольдштейн Б.М. Базальтофибробетон – технология будущего. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10*. 2012;7:91–93. EDN: RCPEVP
- Клюев А.В., Клюев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон, армированный полипропиленовым волокном. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014;4:67–72. EDN: SMLETZ
- Осама аль Хело, Осипчик В.С., Кравченко Т.П. Получение композиционных материалов на основе наполненного полипропилена с улучшенными эксплуатационными характеристиками. *Успехи в химии и химической технологии*. 2007;21(5):66–70.
- Клюев С.В., Авилова Е.Н. Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;1:37–40. EDN: OFMZPK
- Окольников Г.Э., Йочич М., Курлин М. Перспективы применения полидисперсно-армированных фибробетонов. *Системные технологии*. 2021;38:86–88. EDN: MEMCYA
- Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Евтушенко Е.И. Исследование химического взаимодействия стекловолокна с продуктами гидратации цемента. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020;12:119–125. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-119-125> EDN: QYDGYC
- Леонович И.А., Леонович А.А. Механизм разрушения фибробетонов на заполнителе из микросфер зол-уноса. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2009;4:149–158. https://doi.org/10.53078/20778481_2009_4_149 EDN: OITKIDZ
- Нахаев М.Р. Межфазные явления при увлажнении электростатического фибробетона. *Вестник ДГТУ*. 2022;49(1):140–148. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-140-148> EDN: DSNUEM
- Мухаметрахимов Р.Х., Галаудинов А.Р., Гарафиев А.М. Структура и свойства волокнистых композитов на основе модифицированных минеральных вяжущих. *Известия КГАСУ*. 2020;4:62–71. EDN: JKWSRU
- Вишневская Я.Ю., Трунов П.В., Калатози В.В., Бондаренко Д.О. Перспективы повышения эффективности фибробетонов за счет применения композиционных вяжущих. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;3:35–37. EDN: PZLHCS

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

21. Леонович И.А. Прочностные свойства фибробетонов с наполнителем из микросфер при ударном нагружении. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2008;2(19):129–136. https://doi.org/10.53078/20778481_2008_2_129 EDN: OKFNAX
22. Овчаренко Г.И., Песоцкий А.В., Авакумов Е.Г. Влияние минеральных микродобавок на прочность цементного камня. *Ползуновский вестник*. 2014;1:130–134. EDN: SQTNAJ
23. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Рашид кызы Б., Пугачева И.Н., Суйунбек уулу А. Оптимизация состава и свойств керамического композита на основе барита и бентонита. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):715–732. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-715-732> EDN: SQPEGQ
24. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок. *Строительные материалы*. 2016;9:68–72. EDN: WMSCBJ
25. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Хулелидзе К.К., Цидаев Б.С. Влияние активации минеральных добавок к вяжущему на прочность бетонных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;6:66–78. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-66-78> EDN: ZXYNXN
26. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальтово-волоконистого высокопрочного бетона. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018;14(5):396–403. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403> EDN: YQJVAL
27. Афанасьев Е.Н., Жариков И.В., Тарасов С.Н., Солдатова Н.И., Муфтиева Л.Р., Пономарев М.М. Способ производства труб из бетонных смесей: пат. RU 2200657. Оpubл. 20.03.2002.
28. Ерофеев В.Т., Кретов Д.А. Обзор патентов по изготовлению изделий под давлением из высокопрочного фибробетона. *Эксперт: теория и практика*. 2022;2(17):32–35. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_2_32 EDN: MWPZDB
29. Ибе Е.Е., Шугурова А.В. Перспективы применения фибробетона при строительстве гидротехнических сооружений. *Науковедение*. 2017;9(1):1–8. EDN: YMXPFFZ
30. Ширинзаде И.Н., Ахмедов Н.М. Пути повышения эффективности фибробетона. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;3(57):107–110. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.57.125> EDN: YGTZOV
31. Левкович Т.И., Токар Н.И., Мевлидинов З.А., Ласман И.А., Федоров И.С., Ласман В.С. Разработка и исследование свойств составов цементнофибробетонов для дорожного строительства. *Вестник Евразийской науки*. 2021;1:1–10. EDN: WRWAFС
32. Алексеев К.Н., Курилко А.С. Разработка мелкозернистого ударопрочного фибробетона для применения в условиях рудников криолитозоны. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;12-1:15–28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_1_0_15 EDN: ZLWNIO
33. Способ формования фибробетонных изделий: пат. SU 1425091. Оpubл. 23.09.1988.
34. Бондарев Ю.Л., Попов В.А., Бондраева И.Л. Способ приготовления фибробетонных смесей: пат. RU 2194614. Оpubл. 20.12.2002. EDN: HWLLIR
35. Рябов Г.Г., Стенякин А.Н., Хмелевский М.В. Композиционная сырьевая смесь для изготовления фибробетона: пат. RU 2770375. Оpubл. 15.04.2022.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи использовали ИИ только для проверки грамматики и улучшения содержания текста.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдыкалыков Акымбек – доктор технических наук, профессор, советник ректора, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, Кыргызская Республика, abdykalykov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7260-8738>

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, Кыргызская Республика, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Абдыкалык кызы Жыпаргул – старший преподаватель кафедры экономики и налогов, Институт физики имени Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызская Республика, gold_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4958-1240>

Сопубеков Нематилла Абдилахович – кандидат технических наук, доцент, Ошский технологический университет, 723503, Ош, ул. Исанова 81, Кыргызская Республика, nematsopubekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7309-0292>

Суйунбек уулу Акжол – аспирант лабораторий базальтовых волокон и композиционных материалов института Физики им. Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызская Республика, akzhol.toktomushov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9477-4944>

ВКЛАД АВТОРОВ

Абдыкалыков Акымбек – научное руководство, концепция исследования.

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Абдыкалык кызы Жыпаргул – написание текста и обработка полученных данных.

Сопубеков Нематилла Абдилахович – выполнение экспериментальной части исследования.

Суйунбек уулу Акжол – сбор материала по литературным источникам.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 04.04.2026; принята к публикации 09.04.2026.

Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect

Natalia I. Cherkashina¹ , Vyacheslav I. Pavlenko¹ , Sergey V. Serebryakov¹ , Artem Yu. Ruchiy^{1*} ,
Yulia M. Samoylova² 

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46, Russian Federation

² Belgorod Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I.D. Putilin, 71 Gorky St., Belgorod, 308024, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to examine the properties of a synthesized epoxy resin hardener based on dicyclopentadiene and maleic anhydride. **Materials and methods.** The following chemical reagents were used for synthesis: dicyclopentadiene 98%, maleic anhydride (technical), trichloromethane (C.P). The research was carried out with the Sintecor IR 10 FTIR spectrometer, the STA 449 F1 Jupiter thermogravimetric analyzer. **Results and discussion.** Studying the initial substances allowed the calculated and experimental data to be correlated. Subsequent operations then revealed the structure and thermal properties of the obtained adduct. **Conclusion.** As a result of this research, an epoxy resin hardener has been obtained that can withstand a wide range of temperature variations. The synthesized substance is expected to find practical application in self-healing polymer composites.

KEYWORDS: dicyclopentadiene, maleic anhydride, Diels-Alder reaction, polymer composite, FT-IR spectroscopy, thermogravimetry, functional density theory

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No 24-79-10033 <https://rscf.ru/project/24-79-10033/> using equipment on the basis of the Center for High Technologies of BSTU named after V. G. Shukhov.

FOR CITATION:

Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Serebryakov S.V., Ruchiy A.Yu., Samoylova Yu.M. Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(2):210–231. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-210-231>. – EDN: XWXZHG.

Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания

Наталья Игоревна Черкашина¹ , Вячеслав Иванович Павленко¹ , Сергей Викторович Серебряков¹ ,
Артём Юрьевич Ручий^{1*} , Юлия Михайловна Самойлова² 

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация

² Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И.Д. Путилина, 308024, г. Белгород, ул. Горького 71, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение свойств синтезированного отвердителя для эпоксидной смолы на основе дидициклопентадиена и малеинового ангидрида. **Материалы и методы исследования.** Для осуществления синтеза приме-

нялись следующие химические реактивы: дициклопентадиен 98%, малеиновый ангидрид (технический), трихлорметан (ХЧ). Исследования проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра Sintecor IR 10, термогравиметрического анализатора STA 449 F1 Jupiter. Расчеты велись с помощью пакета программ QChem и IQmol. **Результаты и обсуждение.** Исследование исходных веществ позволило соотнести расчетные и экспериментальные данные. Последующие операции позволили определить структуру полученного аддукта и его термические характеристики. **Заключение.** В результате работы получен отвердитель для эпоксидных смол, выдерживающий широкий спектр температурного воздействия. Синтезированное вещество найдет практическое применение в самозалечивающихся полимерных композитах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дициклопентадиен, малеиновый ангидрид, реакция Дильса-Альдера, полимерный композит, ИК-Фурье спектроскопия, термогравиметрия, теория функциональной плотности

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10033 <https://rscf.ru/project/24-79-10033/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Черкашина Н.И., Павленко В.И., Серебряков С.В., Ручий А.Ю., Самойлова Ю.М. Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):210–231. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-210-231>. – EDN: XWXZHG.

INTRODUCTION

Modern autonomous self-healing systems represent a key approach to improving the durability of polymer composites, which are widely used in construction, aviation, energy, medicine, and the space industry. Under operating conditions, minor mechanical damage occurs, leading to a decrease in the material's performance properties and durability [1–4]. Microencapsulated active substances released locally upon damage initiate polymerization reactions, restoring the integrity of structures and part of the strength characteristics [5–10].

Self-healing (self-restoration) of synthetic material is a partial or complete reduction of the damage area due to mass transfer and consolidation of crack boundaries, which leads to partial or complete restoration of the functional properties of the material. In such systems, damage consolidation (self-healing) occurs after crack consolidation provided by mass transfer [11, 12]. Processes can occur autonomously (for example, through the flow of matter within the material) or non-autonomously, where healing is triggered by external stimuli such as elevated temperature or ultraviolet radiation. [13, 14]. Self-healing mechanisms are divided into external and internal types according to their organization. External mechanisms depend on embedded healing agents (e.g., microcapsules with healing substances), while internal mechanisms need no additional repair compounds [15–22].

This research aims at the synthesis of an active substance based on the Diels-Alder reaction between dicyclopentadiene (DCPD) and maleic anhydride (MA). As a result of the reaction, cracks in the polymer composite heal. This interaction is a classic (4+2)-cycloaddition, in which maleic anhydride acts as a highly effective dienophile. Due to its two electron-acceptor carbonyl groups, which reduce the energy of HOMO (LUMO) (lowest unoccupied molecular orbital), it is able to react with

a wide range of conjugated dienes to form the corresponding anhydrides.

In particular, maleic anhydride readily reacts with both acyclic dienes (butadiene, isoprene) and cyclic structures, including cyclopentadiene and polycyclic aromatic compounds such as anthracene [23, 24]. It is this high reactivity that makes it an ideal candidate for the design of molecular building blocks needed to create advanced functional materials with self-healing properties.

The need for such syntheses is dictated by the practical challenges of materials science. When external factors (temperature, humidity) make it difficult to produce stable two-component epoxy plastics, pre-synthesized stable hardeners are required.

MATERIALS, EQUIPMENT, RESEARCH METHODS

Materials

The following reagents were used in the course of the research: dicyclopentadiene ($C_{10}H_{12}$) 98% produced by ACMEC biomechanical Co.ltd Shanghai; trichloromethane ($CHCl_3$) C.P. produced by «ECOS-1» JSC, Moscow; maleic anhydride ($C_4H_2O_3$) technical.

Equipment and research methods

DFT calculations were carried out using the QChem 6.4 program and interpreted in the IQmol 3.1.5 program.

Imaging of FT-IR spectra of compounds was carried out with Sintecor IR 10 in the wavenumber range of 470–4000 cm^{-1} .

Thermogravimetric analysis of the compounds was performed on the STA 449 F1 Jupiter instrument. The samples were heated from 20 to 400 °C at a rate of 10 deg/min in the following atmosphere: 21% O_2 , 79% Ar.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Experimental part

In [25], which focuses on developing capsules containing a healing agent for composites, insufficient attention was paid to the compound that acts as the active species for initiating the chemical reaction.

Dicyclopentadiene (Fig. 1a) is a high-tension molecule with a norbornene base and an adjacent cyclopentene ring. Under normal conditions, it is a viscous liquid with a pungent odor. In general, organic anhydrides and amines are used as hardeners for two-component epoxy systems. In our research we have chosen the anhydride terminus of the molecule as the reaction radical. Maleic anhydride was used as a precursor (Fig. 1b).

In the reaction, it is important to observe the temperature regime (not exceeding 80 °C), since at high temperatures dicyclopentadiene breaks down into 2 molecules of cyclopentadiene. However, the Diels-Alder reaction does not require high temperatures.

In the early studies, high temperatures (160–200 °C) were mostly used for the Diels-Alder reaction using dicyclopentadiene [21].

The Diels-Alder reaction is based on the ability of dienophiles to attach to dienes with low molecular orbital density. Molecular densities were calculated using the QChem program. The calculations were carried out using the Hartree-Fock (HF) method, which is an approximate solution of the Schrödinger equation. Fig. 2 shows a model of molecular orbitals of maleic anhydride.

The parameters of the molecule are specified in the FChk format. The spatial coordinates of the molecule are presented in the Table 1.

The basis for quantum chemical calculations is 6-31G, as this basis is excellent for the calculations of medium-complex systems that do not contain heavy atoms.

The Hartree-Fock model does not provide the most accurate description of molecular structure and its behav-

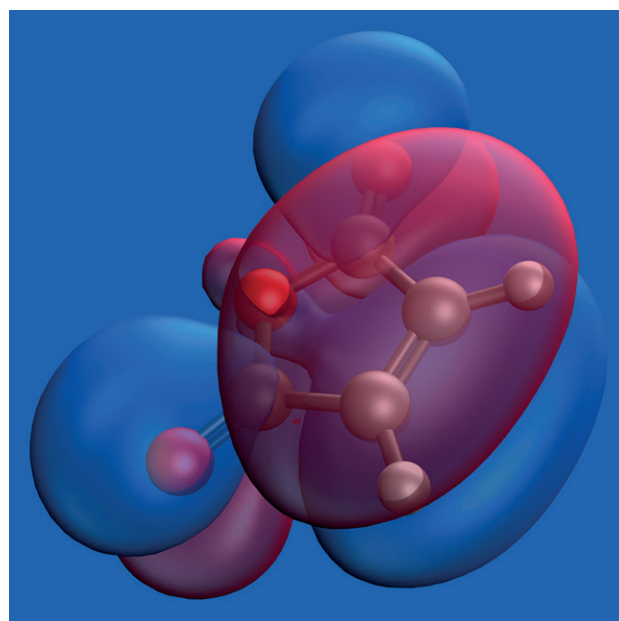


Fig. 2. Model of a maleic anhydride molecule with isolated molecular orbitals

ior, as it reduces the system to the outer shells of the constituent atoms while neglecting the contribution of inner electrons. Nevertheless, a quantum system obtained via the HF method can be correlated with experimental data.

Molecular orbitals of dicyclopentadiene were also modeled. The result is presented in Fig. 3.

The spatial coordinates of the dicyclopentadiene molecule are presented in the Table 2.

The reaction between dicyclopentadiene and maleic anhydride was carried out in dried chloroform in a nitrogen medium. As the Diels-Alder mechanism (Fig. 4) provides, the reaction takes place without transition states with the breaking of double bonds at low activation energy.

The peculiarity of the Diels-Alder reaction is that it takes place mainly with aromatic cycles. The calculated

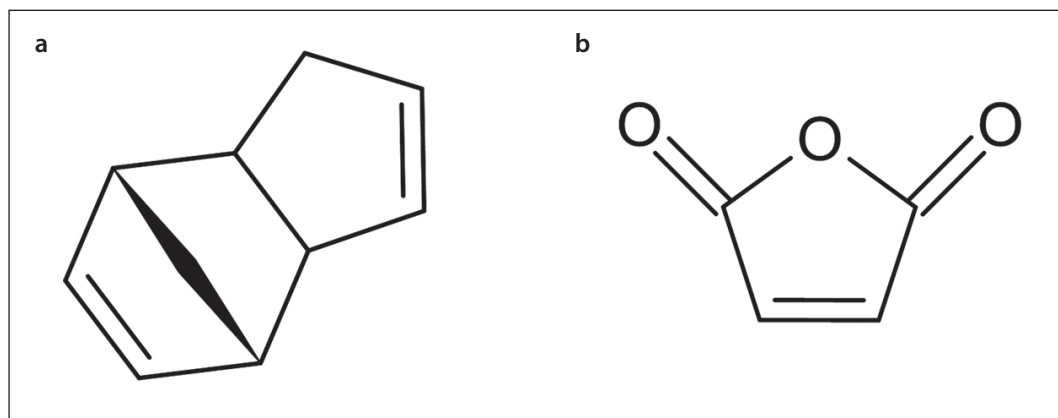
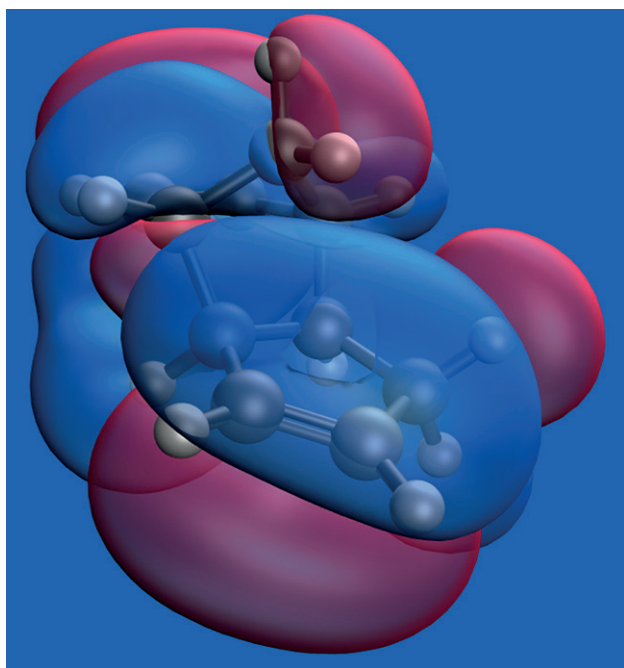


Fig. 1. Structural formula: a) DCPD; b) MA

Table 1. Spatial coordinates of the MA molecule

01*			
Atom	x	y	z
C	0.6623095	-1.2489674	0.0000000
C	-0.6623106	-1.2489670	0.0000000
C	-1.1376593	0.1599721	0.0000000
C	1.1376590	0.1599714	0.0000000
O	0.0000001	0.9570981	0.0000000
O	2.2470393	0.5977750	0.0000000
O	-2.2470392	0.5977764	0.0000000
H	1.3356524	-2.0762104	0.0000000
H	-1.3356540	-2.0762096	0.0000000

* Indication of the number of objects in the coordinate area (0 – free space, 1 – molecule)

**Fig. 3.** A model of a dicyclopentadiene molecule with isolated molecular orbitals.

NMR spectrum of dicyclopentadiene (Fig. 5) indicates the aromaticity of this compound. The results of the calculation are presented in the Table 3.

The results of the calculation indicate a spectrum shift in the region of ~8 and ~7 ppm, which meets the aromaticity conditions of the compound.

The reaction was monitored using FT-IR spectroscopy. The analysis was performed with a Sintecor IR10 spectrometer in potassium bromide tablets.

In the FT-IR spectra of maleic anhydride (Fig. 6, Table 4), the modes characteristic of aromatic heterocycles (~1240 and ~1059 cm⁻¹) is traced, and it is also worth

emphasizing that the obtained spectra are identical to those specified in the literature [26].

In the FT-IR spectra of dicyclopentadiene (Fig. 7, Table 5), vibrational modes characteristic of cyclic compounds with the presence of double bonds are traced.

The FT-IR spectrum of the dicyclopentadiene and maleic anhydride adduct (Fig. 8, Table 6) has few modes in common with the initial compounds. This is due to the complex three-dimensional geometry of the adduct in conjunction with the variety of conformations of the compound.

Figure 9 clearly shows the discrepancy between the vibrational modes of the adduct and the initial compounds (DCPD and MA), which directly indicates the formation of a new compound.

2. Calculation part

To confirm the results of the synthesis, calculations were made of the frequencies of oscillations of molecular bonds. It is known that each frequency of bond oscillation has its own shear tensor, which depends on the density of bonds and shifts the frequency of radiation. The shear tensor was selected on the basis of the selection of real and calculated FTIR data of the spectra of the initial substances. The resulting scale factor was 0.905 for both dicyclopentadiene (Fig. 10, Table 7) and maleic anhydride (Fig. 11, Table 8) and was set for the most intense modes.

Fig. 11. Visual correlation of experimental (top) and calculated (bottom) oscillatory modes of MA

Referring to the design of the experiment, the formula of the resulting compound should contain two combined norbornenoric rings with an anhydride appendage (Fig. 12).

However, the obtained FT-IR spectroscopy data (Fig. 13) do not fully coincide with the calculated data (Tables 9–12), which indicates that a mixture of substances

Table 2. Spatial coordinates of the DCPD molecule

01			
Atom	x	y	z
C	2.4796350	0.1410729	-0.0683041
C	1.6804108	1.1941252	0.1057580
C	1.7488112	-1.1630978	0.0926355
C	0.3643315	-0.7244309	0.4318390
C	0.3472054	0.7291123	0.4609470
C	-0.8958314	1.0722448	-0.2545958
C	-0.8628465	-1.0467290	-0.3273888
C	-2.0541842	-0.7067548	0.4813796
C	-2.0739739	0.6378653	0.5295530
C	-0.8910027	0.0509215	-1.3260295
H	3.4853189	0.2129811	-0.2884243
H	1.9620733	2.1817942	0.0047628
H	2.1725093	-1.7477525	0.8822929
H	1.7956651	-1.7857229	-0.7762965
H	0.2584193	-1.3209837	1.3137729
H	0.2439873	1.2754131	1.3751688
H	-0.9388543	2.1120129	-0.5034561
H	-0.8677873	-2.0639699	-0.6591968
H	-2.7252416	-1.3599432	0.9150281
H	-2.7627270	1.2376484	1.0100771
H	-0.0244552	0.0867506	-1.9526967
H	-1.6542394	0.0657942	-2.0757952

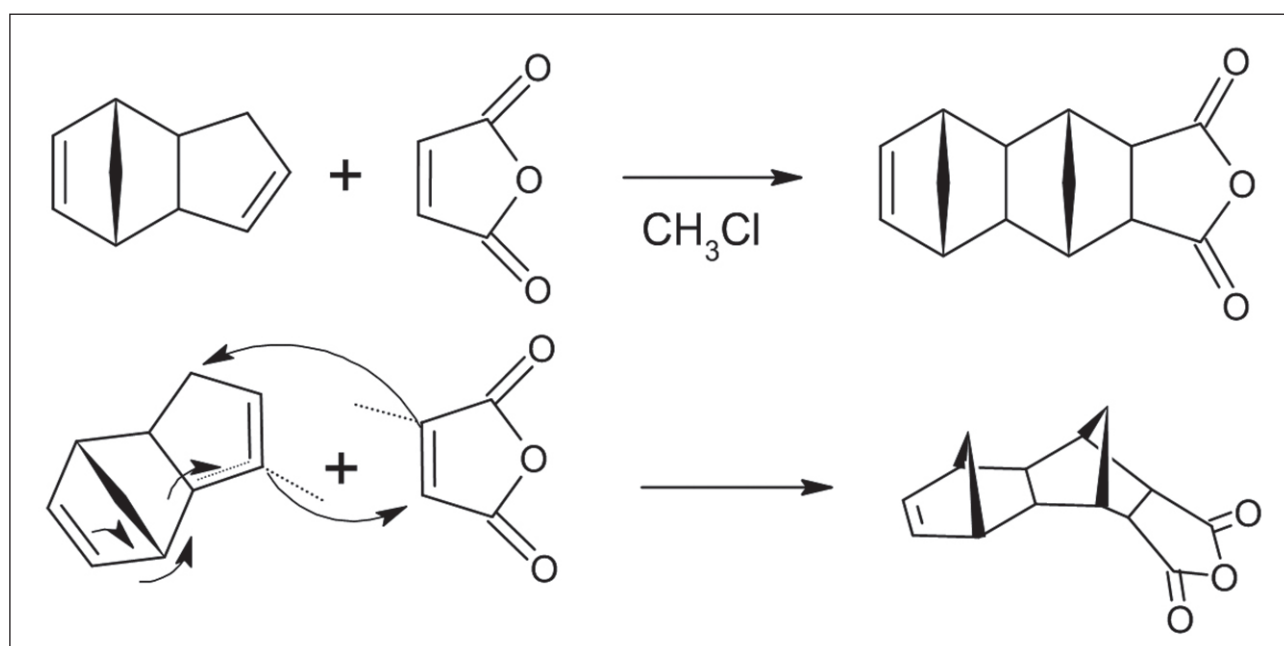
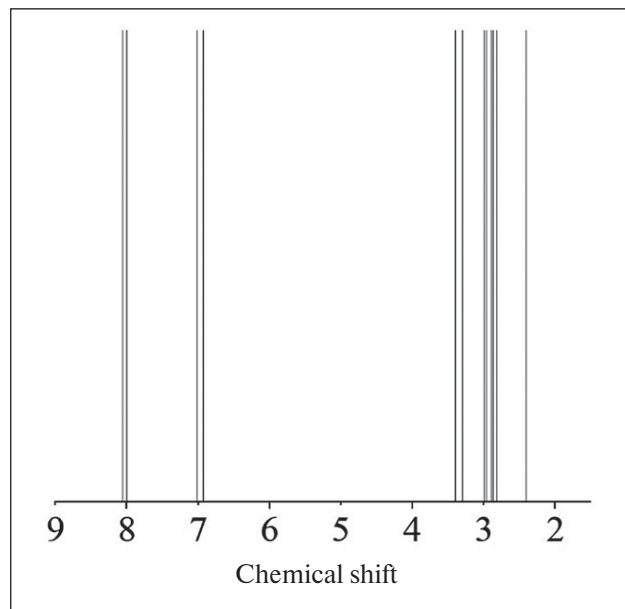
**Fig. 4.** Mechanism of the Diels-Alder reaction for DCPD and MA

Table 3. Magnetic Resonance Values of Hydrogen Atoms in DCPD

Atom	Chemical shift, m.d.											
1H	6.93	7.01	3.30	2.82	2.99	3.40	2.96	2.87	8.06	8.00	2.90	2.41

**Fig. 5.** Calculated NMR spectrum of DCPD

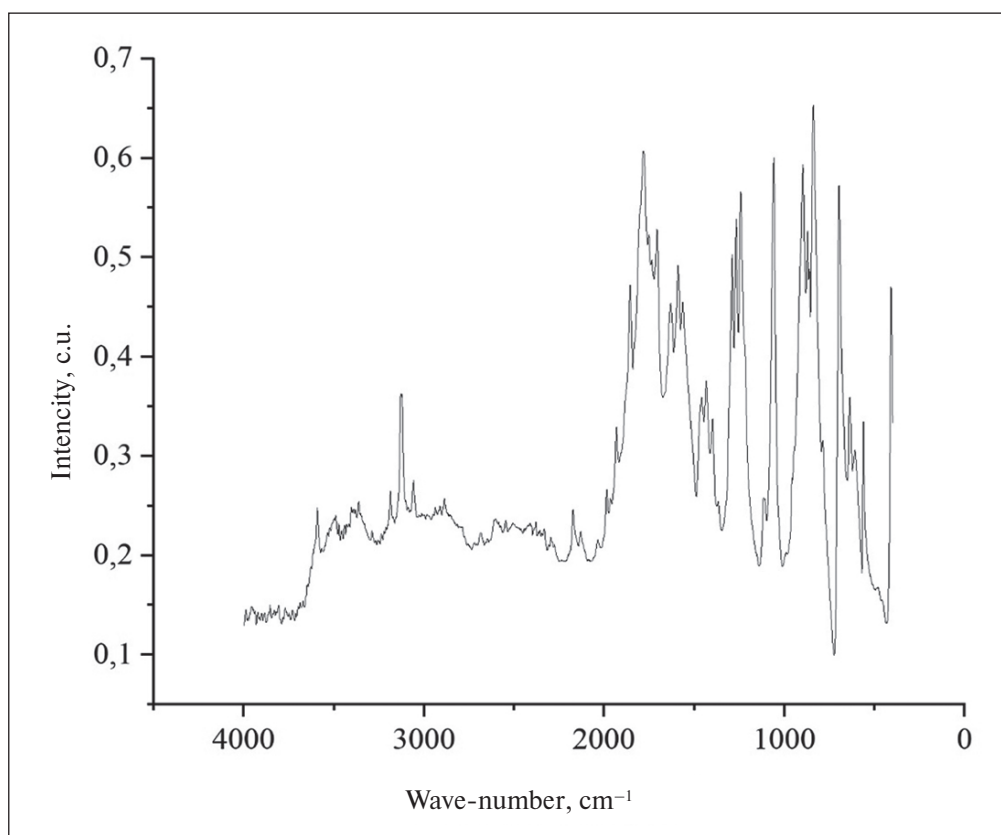
has been obtained. Namely, the presence of a fraction of anhydride hydrolyzed to carboxylic acid in the mixture, together with the incomplete convergence, was affected by the various conformations of the compounds.

The acid-type adduct molecule (Fig. 11) is a nonlinear molecule, which means that the number of permissible modes satisfies the formula $3N-6$ (where N is the number of atoms in the molecule).

According to the models presented in Fig. 14 and 15 trace the complex spatial structure of acid-type and anhydride adduct molecules, which in the future will increase

Table 4. Interpretation of MA oscillatory modes

Absorption area, cm^{-1}	Characteristics
1853	ν C=O (in cyclic anhydrides)
1782	ν C=O (in cyclic anhydrides)
1632	C=C (conjugate with C=O)
1240	aromatic and vinyl (=C-O-C-)
1059	aromatic and vinyl (=C-O-C-)

**Fig. 6.** FT-IR spectrum of maleic anhydride

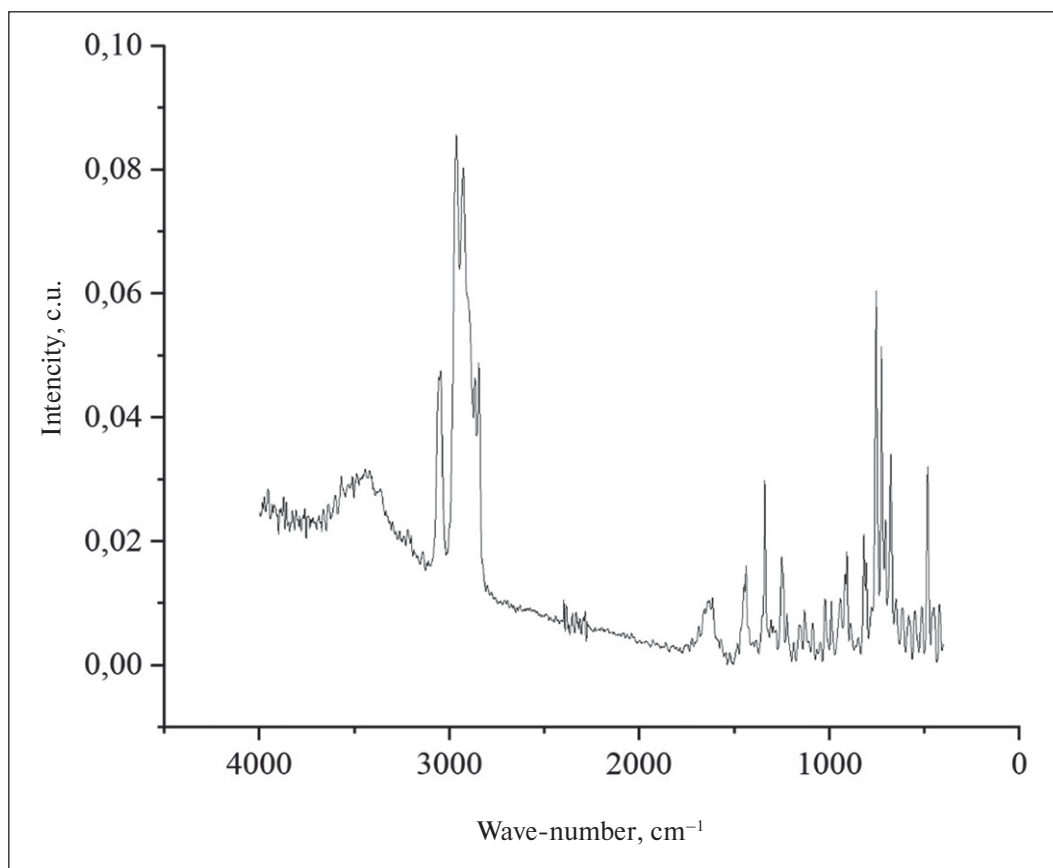
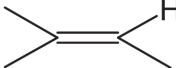


Fig. 7. FT-IR spectrum of dicyclopentadiene

Table 5. Deciphering the oscillatory modes of DCPD

Absorption area, cm^{-1}	Characteristics
3048	ν as $\text{HRC}=\text{CH}^2$
2962	$-\text{CH}^2-$
2924	$-\text{CH}^2-$
2844	$-\text{CH}^2-$
1439	$-\text{CH}^2-$
1336	$=\text{CH}$
1250	δ (ar $\text{C}-\text{H}$) _{ip} (in-plane vibrations)
912	δ $\text{C}=\text{C}$
815, 750, 728, 680	

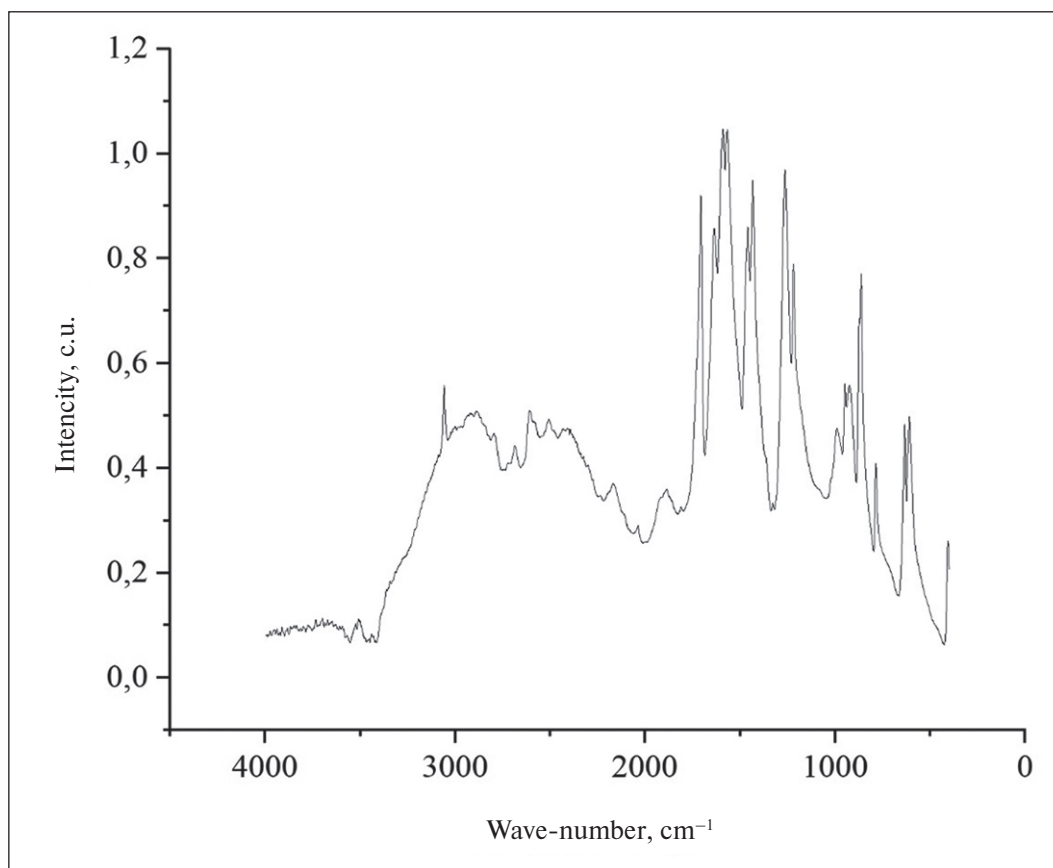


Fig. 8. FT-IR spectrum of DCPD and MA adduct

Table 6. Interpretation of the vibrational modes of the DCPD and MA adduct

Absorption area, cm^{-1}	Characteristics
3062	ν as HRC=CH ₂
1708	Aromatic aldehydes
1585	ν ar
1429	CH ₂ -C=O
1265	Aromatic Acid Ester
1215	ν C-O st

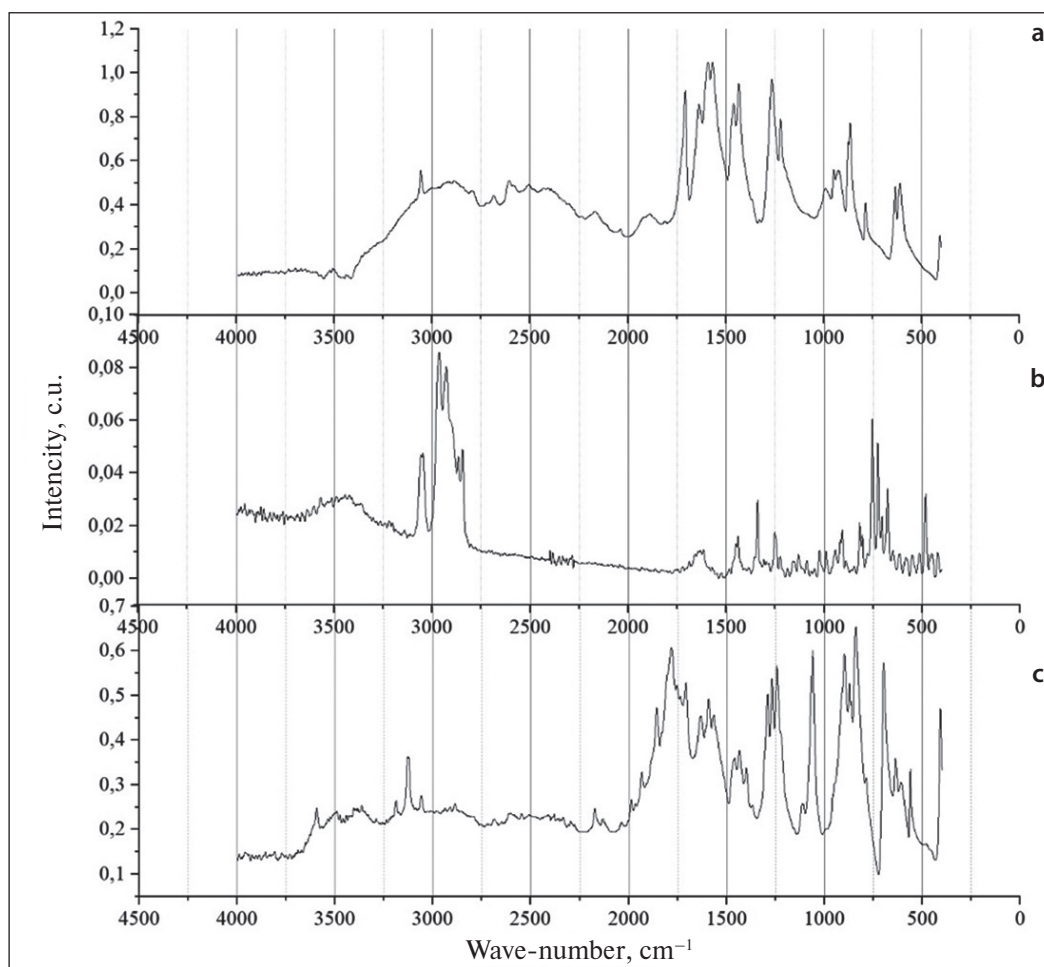


Fig. 9. Comparison of FT-IR spectra: a) adduct; b) DCPD; c) MA

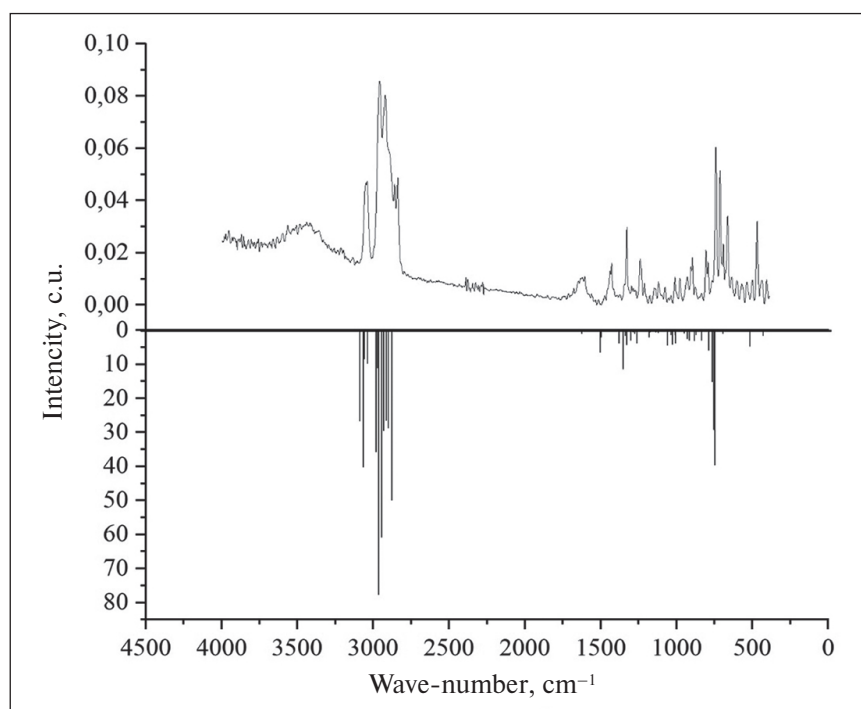


Fig. 10. Visual correlation of experimental (top) and calculated (bottom) oscillatory modes of DCPD

Table 7. Estimated FT-IR spectroscopy values for CPDD

Frequency, cm ⁻¹	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
428.05	1.538	12832.61616
443.84	0.256	13305.98846
514.62	4.706	15427.91947
634.13	0.337	19010.73914
691.25	0.952	20723.15366
745.55	39.513	22351.02671
754.86	29.19	22630.13348
763.49	15.155	22888.85438
788.49	5.915	23638.33552
834.86	2.925	25028.47315
871.33	1.31	26121.81624
881.14	3.061	26415.91264
892.25	0.095	26748.98207
915.66	2.874	27450.79621
929.45	2.451	27864.21001
949.67	0.896	28470.39036
975.62	0.096	29248.35179
1004.6	3.812	30117.15033
1008.56	1.351	30235.86814
1023.96	4.053	30697.54853
1034.88	1.31	31024.92189
1037.16	1.296	31093.27457
1058.63	4.365	31736.92898
1118.38	0.705	33528.18892
1125.83	0.311	33751.5343
1138	0.547	34116.38172
1173.75	0.63	35188.13976
1180.26	2.096	35383.30465
1207.66	0.27	36204.73598
1261.29	3.746	37812.52294
1274.11	1.019	38196.85687
1282.7	0.536	38454.37859
1299.4	2.922	38955.03199
1304.4	0.133	39104.92822
1327.05	4.215	39783.95814
1337.37	1.656	40093.34396
1339.31	0.27	40151.50369
1350.23	11.368	40478.87706
1377.01	3.887	41281.72126
1495.96	2.045	44847.75255
1502.75	6.502	45051.31163
1623.81	0.939	48680.59912
1667.57	0.3	49992.49092
2876.06	49.931	86222.10968
2900.43	28.764	86952.7039
2911.82	26.492	87294.16751
2930.43	29.431	87852.08127
2944.63	60.856	88277.78656
2963.09	77.664	88831.20344
2970.26	11.14	89046.15463
2979.99	35.781	89337.85269
3037.22	9.784	91053.56493
3058.85	8.456	91702.01602
3065.99	40.144	91916.06783
3087.53	26.654	92561.82078

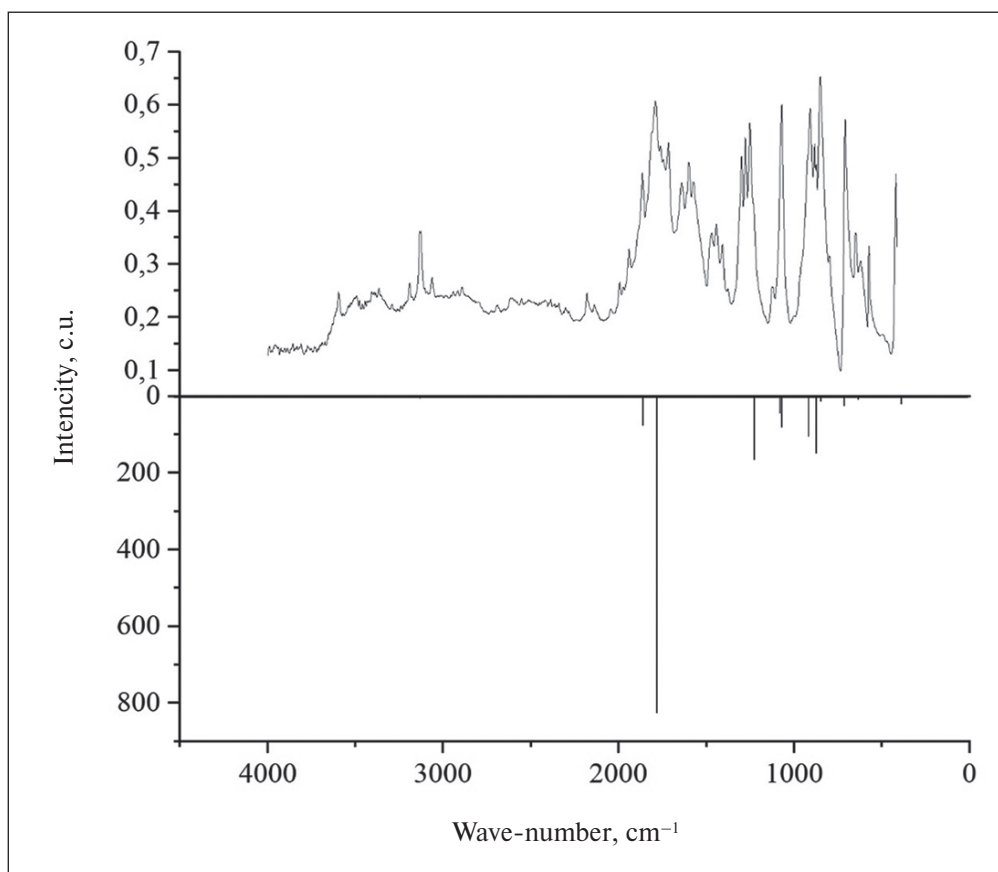


Fig. 11. Visual correlation of experimental (top) and calculated (bottom) oscillatory modes of MA

Table 8. Calculated FT-IR spectroscopy values for MA

Frequency, cm^{-1}	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
389.58	20.435	11679.31458
541.85	2.723	16244.25434
624.48	1.143	18721.43942
634.17	8.008	19011.93831
715.12	25.234	21438.75826
848.37	12.421	25433.49276
873.53	148.693	26187.77058
916.46	104.567	27474.77961
1069.96	80.398	32076.59384
1078.17	43.965	32322.72344
1225.12	165.313	36728.17361
1336.65	1.2	40071.7589
1634.12	0.78	48989.68515
1781.76	824.756	53415.821
1860.36	75.998	55772.18972
3132.14	5.095	93899.19494
3153.54	2.576	94540.7508

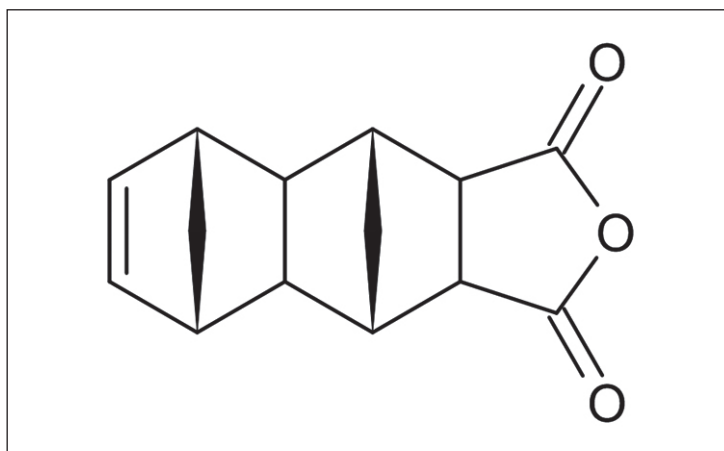


Fig. 12. Structural Formula of Adduct

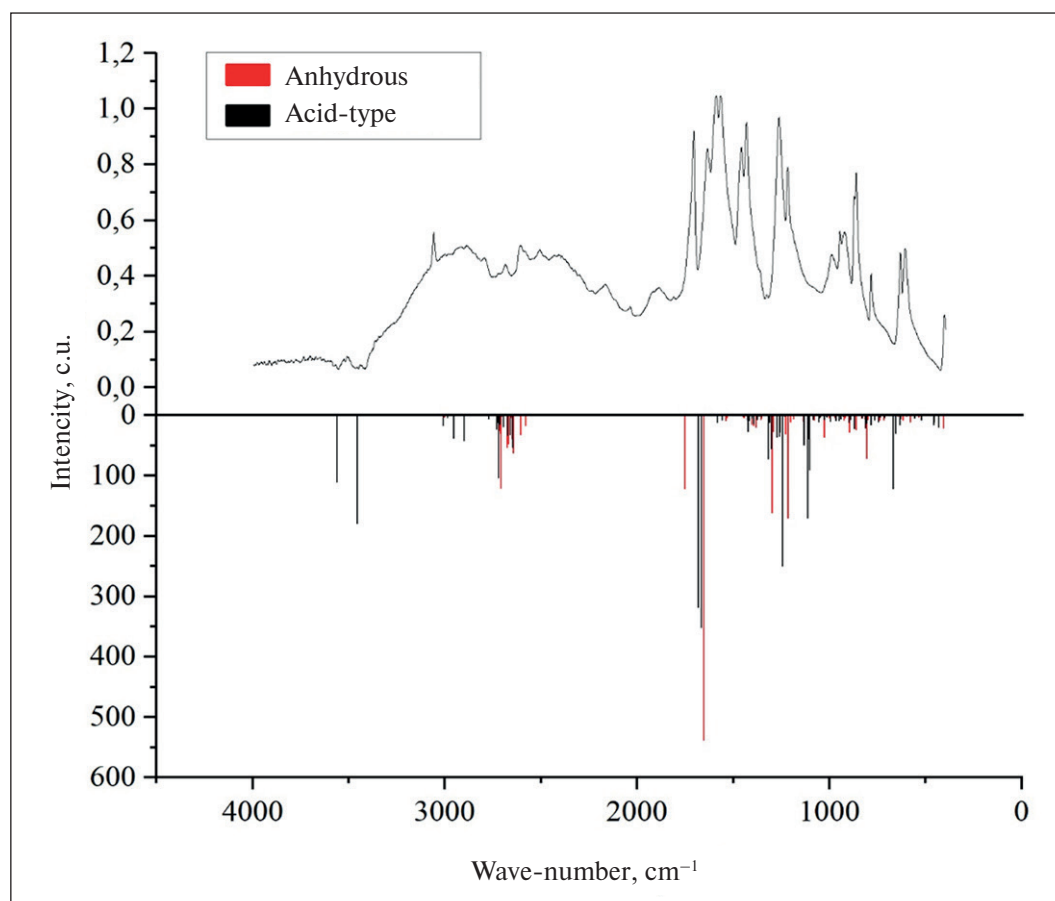


Fig. 13. Visual Ratio of Experimental (Top) and Calculated (Bottom) Oscillatory Modes of Adduct

Table 9. Spatial coordinates of acid-type adduct

01			
Atom	x	y	z
C	2.9315102	-0.4174406	1.6091419
C	3.0254627	0.9295588	1.3136708
C	2.5569832	1.0810698	-0.1118783
C	2.4354607	-1.0829987	0.3549941
C	1.0075778	0.8395233	-0.0474390
C	0.9366974	-0.6749013	0.1934086
C	3.1804623	-0.2181038	-0.6485449
C	0.0885279	1.0442277	-1.2931481
C	0.1326389	-1.1619874	-1.0557912
C	0.4111278	-0.1415290	-2.1722666
C	-1.3729620	-0.8532875	-0.8165288
C	-1.3983933	0.7122421	-0.9406452
C	-1.9957753	-1.6446249	0.3355181
C	-2.0030276	1.5651346	0.1580316
O	-1.7881948	-2.8468094	0.3722530
O	-2.9465504	2.2957288	-0.1068009
H	3.2705296	-0.8883887	2.5219852
H	3.4448724	1.6890988	1.9595683
H	2.8475685	2.0572784	-0.5530969
H	2.6120350	-2.1790877	0.3454574
H	0.6533427	1.4831682	0.7777780
H	0.4022466	-0.9818845	1.1194377
H	4.2915592	-0.2513373	-0.5230865
H	3.0402717	-0.5105674	-1.6868551
H	0.1937191	2.0531199	-1.7463991
H	0.2912302	-2.2359798	-1.2932265
H	1.3958228	-0.0862649	-2.6267948
H	-0.2666615	-0.2484397	-3.0524763
H	-1.8902733	-1.2555622	-1.7204702
H	-1.9918819	0.9341792	-1.8604735
O	-1.5394470	1.5213264	1.4257724
O	-2.8230620	-1.1274285	1.2703571
H	-1.9304899	2.0635870	2.1254570
H	-3.2036012	-0.2467562	1.2494032

Table 10. Calculated FT-IR spectroscopy values for acid-type adduct

Frequency, cm ⁻¹	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
422.57	20.269	12668.3299
447.17	11.099	13405.81934
450.67	16.077	13510.7467
512.86	7.682	15375.156
549.09	5.115	16461.30408
623.69	4.113	18697.75581
624.58	15.528	18724.43734
648.84	29.641	19451.73384
659.62	121.386	19774.91011
705.31	3.605	21144.66186
728.38	2.813	21836.28306
736.44	11.004	22077.91578
758.08	8.117	22726.66666
776.43	16.301	23276.78582
797.25	12.662	23900.95371
803.67	20.553	24093.42047
820.49	4.897	24597.67139
839.18	1.083	25157.98349
860.86	22.029	25807.93354
881.8	6.678	26435.69895
891.52	12.292	26727.09722
918.94	2.097	27549.12814
930.99	5.779	27910.37805
941.31	8.886	28219.76386
957.17	9.116	28695.2347
964.13	0.214	28903.89025
972.71	0.519	29161.11218
978.42	0.533	29332.29368
986.96	9.955	29588.31643
1007.62	2.311	30207.68765
1017.83	6.729	30513.77575
1029.65	0.059	30868.13044
1041.28	3.848	31216.78907
1047.66	10.789	31408.05665
1075.43	7.279	32240.58031
1096.16	90.5	32862.05008
1100.02	38.732	32977.76996
1104.11	170.566	33100.38508
1124.34	48.975	33706.86522
1160.94	1.009	34804.10562
1173.06	0.653	35167.45408
1223.67	1.858	36684.70371
1235.77	250.109	37047.45258
1248.66	27.666	37433.88506
1252.76	34.813	37556.79997
1266.45	36.227	37967.21584
1295.06	55.499	38824.92207
1304.86	11.617	39118.71867
1308.39	72.373	39224.54541
1323.08	0.9	39664.94053
1327.07	1.115	39784.55772
1344.79	0.713	40315.78996
1348.62	1.393	40430.61047
1356.6	1.303	40669.84485

Continuation of the table 10

Frequency, cm ⁻¹	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
1366.65	6.555	40971.13627
1382.97	0.399	41460.39756
1385.78	14.103	41544.63924
1396.3	4.341	41860.02091
1408.07	8.986	42212.87663
1414.65	26.854	42410.14007
1419.76	8.025	42563.33402
1441.9	1.849	43227.07452
1472.23	0.511	44136.34504
1548.59	7.743	46425.56025
1576.03	12.235	47248.19076
1658.89	351.456	49732.27107
1674.47	318.638	50199.34771
2641.04	4.868	79176.38733
2641.32	52.917	79184.78152
2652.92	31.788	79532.54077
2665.56	33.243	79911.47843
2687.34	18.641	80564.42641
2705.95	14.62	81122.34017
2712.14	103.301	81307.9117
2715.66	11.926	81413.43865
2721.45	23.145	81587.01848
2765.65	5.958	82912.10115
2893.39	42.332	86741.65001
2946.02	37.782	88319.45771
2979.68	3.343	89328.55913
3001.52	17.068	89983.30585
3447.18	179.288	103343.85654
3553	110.917	106516.26033

Table 11. Spatial coordinates of anhydride adduct

01			
Atom	x	y	z
C	1.3141048	-0.8258545	0.7555059
C	1.8636569	0.5797013	1.1233108
C	1.3136704	-0.8260783	-0.7556297
C	0.9459339	1.6700943	0.6886091
C	0.9453752	1.6699677	-0.6888182
C	1.8627855	0.5794921	-1.1241021
C	2.9091976	0.7381951	-0.0008188
C	-0.0067794	-1.5607134	1.1291011
C	-0.0072583	-1.5613396	-1.1282846
C	0.0056923	-2.6205850	0.0007008
C	-1.3502770	-0.8831259	-0.7584379
C	-1.3499481	-0.8826069	0.7593555
C	-1.6585750	0.5329433	-1.0952327
C	-1.6581462	0.5337199	1.0952492
O	-1.8547783	1.2974647	-0.0002341

Continuation of the table 11

01			
Atom	x	y	z
O	-1.7655017	0.9622375	-2.2325926
O	-1.7646851	0.9638282	2.2323242
H	2.1217957	-1.5260150	1.0874806
H	2.1868443	0.6667752	2.1819437
H	2.1212860	-1.5262038	-1.0878534
H	0.4548516	2.4031158	1.3144979
H	0.4537700	2.4029058	-1.3143913
H	2.1851463	0.6664242	-2.1829953
H	3.7010840	-0.0469545	-0.0010657
H	3.4147047	1.7347850	-0.0011056
H	0.0020068	-1.9061375	2.1848889
H	0.0011191	-1.9073439	-2.1838870
H	-0.8832067	-3.2961578	0.0010851
H	0.9121854	-3.2713050	0.0006845
H	-2.1844541	-1.5229043	-1.1293408
H	-2.1840079	-1.5220869	1.1310275

Table 12. Calculated FT-IR spectroscopy values for anhydride adduct

Frequency, cm ⁻¹	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
410.34	20.798	12301.68372
447.04	0.108	13401.92204
452.81	0.34	13574.90229
512.65	0.083	15368.86036
540.11	2.66	16192.09045
583.31	11.284	17487.19387
603.5	2.094	18092.47484
623.11	7.605	18680.36785
634.16	5.53	19011.63852
649.2	2.209	19462.52637
704.06	0.195	21107.1878
722.3	8.026	21654.00924
743.4	7.966	22286.57133
803.65	6.472	24092.82089
812.01	71.561	24343.44738
822.12	5.752	24646.53756
836.74	4.914	25084.83413
850.63	1.196	25501.24585
866.8	23.662	25986.01026
888.17	0.285	26626.66674
900.77	27.931	27004.40524
924.88	3.645	27727.20486
930.61	7.682	27898.98593
943.97	0.001	28299.50866
977.26	3.81	29297.51775
978.09	0.077	29322.40052
1001.16	3.327	30014.02173
1006.85	4.062	30184.60363

Continuation of the table 12

Frequency, cm ⁻¹	Intensity, km/mol	Frequency, GHz
1030.99	35.867	30908.30263
1050.49	1.817	31492.89792
1059.63	8.584	31766.90823
1060.77	1.805	31801.08457
1082.62	7.888	32456.13109
1086.62	2.614	32576.04807
1116.28	0.009	33465.2325
1140.17	9.58	34181.43668
1190.55	2.941	35691.79109
1190.79	5.585	35698.98611
1207.73	11.332	36206.83453
1221.86	170.62	36630.44127
1232.36	30.557	36945.22335
1247.26	0.763	37391.91412
1252.95	0.017	37562.49603
1277.51	6.069	38298.7863
1297.27	26.617	38891.1762
1304.24	160.98	39100.13154
1319.25	2.267	39550.12002
1323.33	9.511	39672.43534
1348.88	0.154	40438.40507
1353.42	0.543	40574.51085
1358.26	4.683	40719.6104
1359.97	6.721	40770.87491
1376.71	0.099	41272.72749
1378.17	0.068	41316.49718
1388.08	20.313	41613.59151
1399.99	16.719	41970.64433
1410	14.426	42270.73658
1428.49	0.831	42825.05283
1449	3.392	43439.92716
1450.76	3.7	43492.69064
1490.06	0.136	44670.875
1538.8	3.651	46132.06344
1542.11	9.08	46231.29474
1659.2	538.551	49741.56463
1757.81	122.141	52697.81806
2585.12	16.98	77499.9479
2612.64	32.105	78324.97675
2650.31	62.449	79454.29494
2655.43	38.88	79607.78867
2659.4	3.407	79726.80628
2674.23	46.842	80171.3985
2676.19	3.902	80230.15782
2683.17	53.369	80439.41295
2711.71	1.28	81295.02063
2714.1	120.37	81366.67103
2717.61	29.596	81471.89818
2721.58	24.989	81590.91578
2986.73	0.033	89539.91281
3006.64	2.433	90136.79959

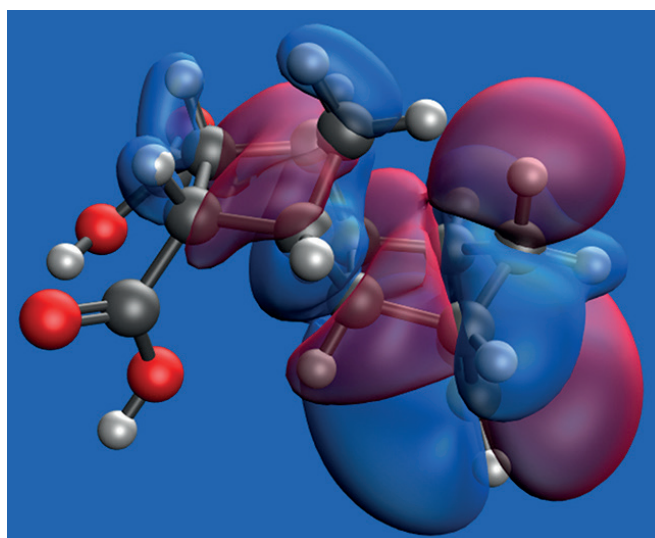


Fig. 14. Model of an acid-type adduct molecule with isolated molecular orbitals

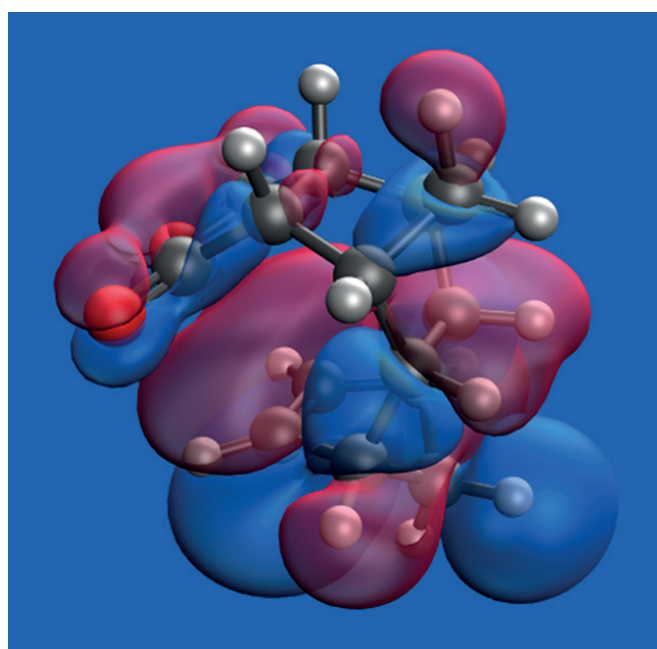


Fig. 15. Model of an anhydride adduct molecule with isolated molecular orbitals

the tensile strength and compression strength of the final epoxy structures due to the twisting of polymer chains. The possibility of obtaining other conformations of the compounds is also explored.

One of the major performance properties of the material is resistance to high temperatures. As follows from the data of Fig. 16, MA has low temperature resistance and is subject to structural transformations. Noticeable destruction begins at 100–110 °C. The study was conducted on a solid crystal of maleic anhydride (MA), indicating that the rate of degradation increases as the particle size decreases.

The results of the TGM adduct (Fig. 17), on the contrary, demonstrate an increase in resistance to temperatures relative to DCPD (evaporates at 40–60 °C, does not reach the operating temperature of the measuring equipment) and MA, destruction begins at 150 °C. Noticeable structural changes also begin to occur at 140–150 °C, which meets the requirements for polymer composites for space applications.

Differentiation of TGM indicators (DTGM) (Fig. 18) shows a smoother change in the course of adduct destruction relative to maleic anhydride, which, from an

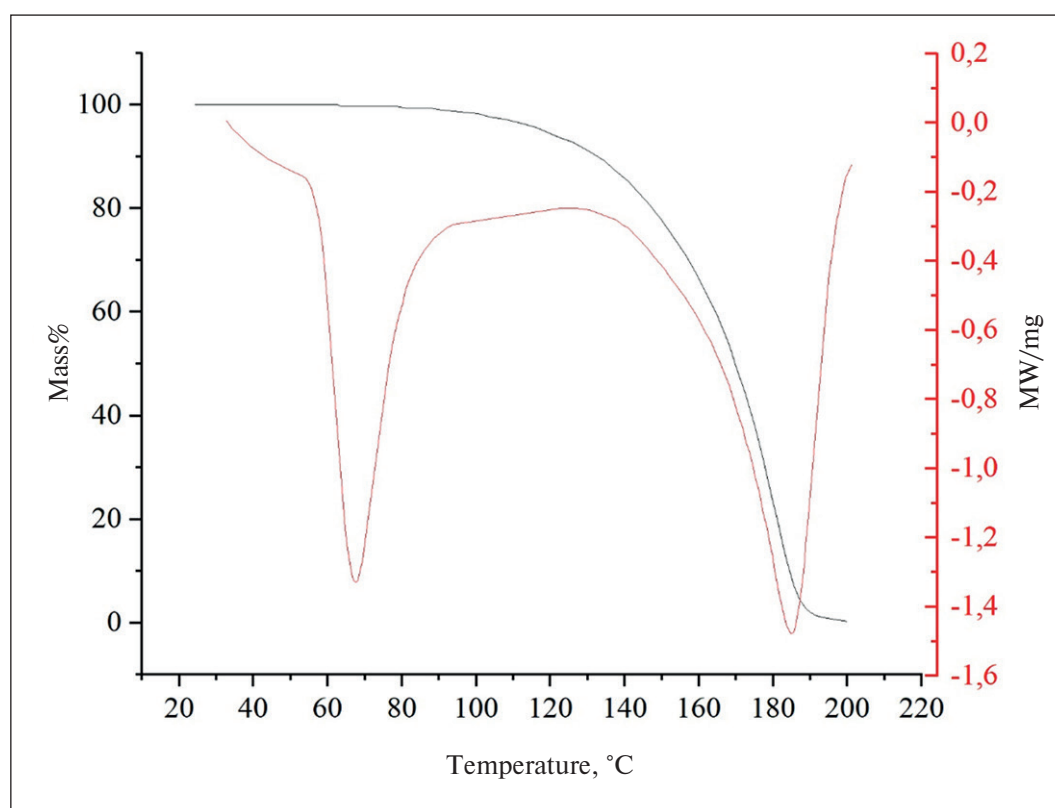


Fig. 16. Thermogravimetric Analysis of Maleic Anhydride

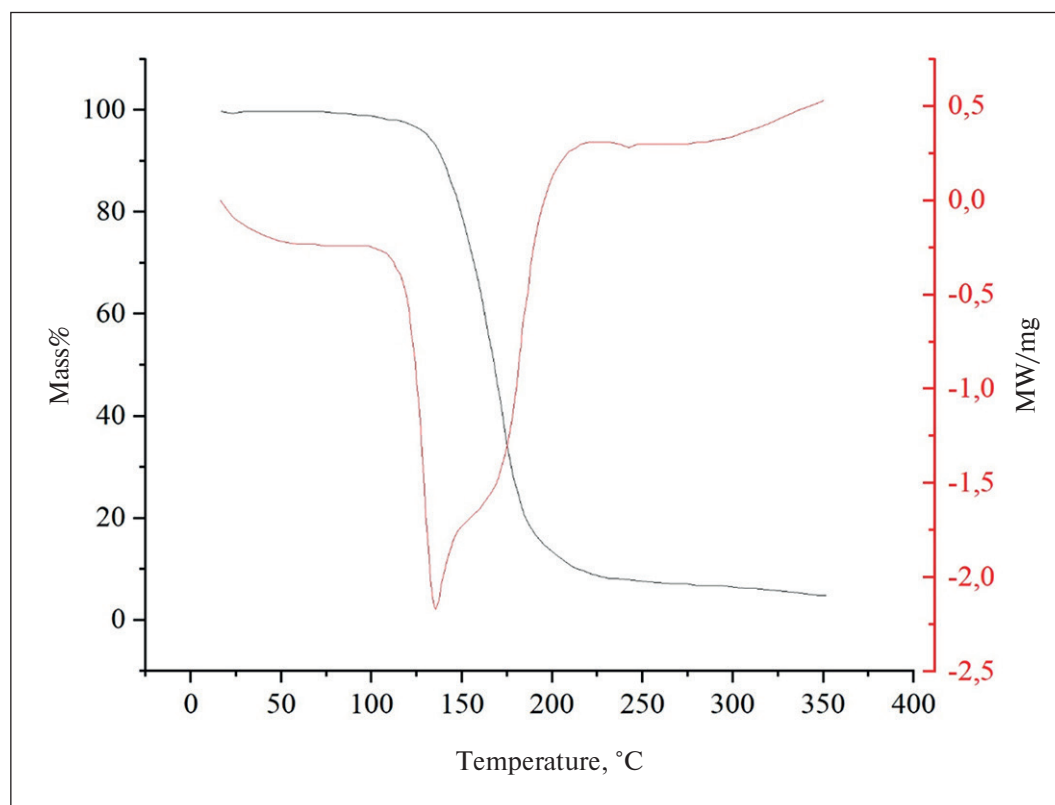


Fig. 17. Thermogravimetric Adduct Analysis

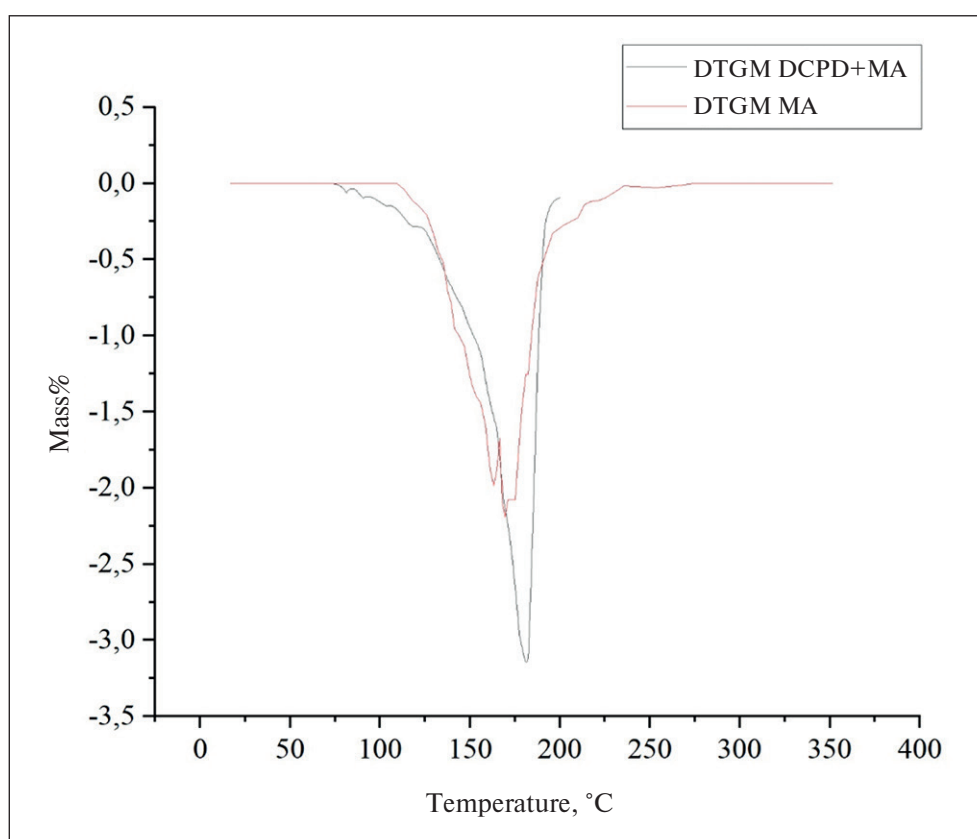


Fig. 18. DTGM adduct and MA curves

engineering point of view, facilitates the subsequent prediction of the mechanical parameters of the composite when calculating loads on composites.

CONCLUSION

The use of two-component functional epoxy resins is the most promising approach for producing self-healing materials. Their broad, tunable temperature range and branched structure, combined with high reactivity, yield

a more reliable final material from an engineering standpoint compared to other composite systems.

As a result of the research, a heat-resistant (up to 150 °C) epoxy resin hardener has been obtained, which is confirmed by the results of thermogravimetric analysis. Calculations performed using density functional theory (DFT) confirmed the formation of adducts from the reaction between DCPD and MA. The resulting adduct is suitable for use as a hardener for epoxy resins in self-healing polymer composites.

REFERENCES

1. Kanu N.J., Gupta E., Vates U.K., Singh G.K. Self-healing composites: A state-of-the-art review. *Composite Part A*. 2019; 121:474–486. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.012>. – EDN: VWZXCK
2. Priyadarsini M., Sahoo D.R., Biswal T. A new generation self-healing composite materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 47:1229–1233. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.456>. – EDN: YNPYCU
3. Das R., Melchior C., Karumbaiah K.M. Self-healing composites for aerospace applications. *Advanced composite materials for aerospace engineering*. 2016; 333–364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00011-0>
4. Kontiza A., Kartsonakis I.A. Smart composite materials with self-healing properties: A review on design and applications. *Polymers*. 2024; 16(15):2115. <https://doi.org/10.3390/polym16152115>. – EDN: COXYEL
5. Hia I.L., Vahedi V., Pasbakhsh P. Self-healing polymer composites: prospects, challenges, and applications. *Polymer Reviews*. 2016; 56(2):225–261. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1106555>

6. Mobaraki M., Ghaffari M., Mozafari M. Basics of self-healing composite materials. *Self-healing composite materials*. 2020; 15–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00002-8>
7. Islam S., Bhat G. Progress and challenges in self-healing composite materials. *Materials advances*. 2021; 2(6):1896–1926. <https://doi.org/10.1039/D0MA00873G>. – EDN: QHNMAC
8. Wang Y., Pham D.T., Ji C. Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*. 2015; 2(1): 1075686. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>. – EDN: XUODAT
9. Adil M. M., Rabbi M. S., Tasnim T. Development of microcapsule-based self-healing composite: A critical review on influencing factors of microencapsulation, healing efficiency, thermal stability and application. *Alexandria Engineering Journal*. 2025; 122:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.02.092>. – EDN: CSNNAR
10. Ramezani M.J., Rahmani O., Ebrahimnezhad-Khaljiri H. Effect of graphene nanoplates in self-healing composite containing urea-formaldehyde microcapsules under tensile and interlaminar shear strength tests. *Results in Engineering*. 2025; 106357. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106357>. – EDN: KMQDRG
11. Paladugu S.R.M., Sreekanth P.S.R., Sahu S.K., Naresh K., Karthick S.A., Venkateshwaran N., Ramoni M., Mensah R.A., Das O., Shanmugam R. A comprehensive review of self-healing polymer, metal, and ceramic matrix composites and their modeling aspects for aerospace applications. *Materials*. 2022; 15(23):8521. <https://doi.org/10.3390/ma15238521>. – EDN: QFSGNS
12. Kumar E.K., Patel S.S., Kumar V., Panda S.K., Mahmoud S.R., Balubaid M. State of art review on applications and mechanism of self-healing materials and structure. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023; 30(2):1041–1055. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09827-3>. – EDN: XCARXF
13. Yao Jialan, Yang Chenpeng, Zhu Chengfei, Hou Baoqing. Preparation Process of Epoxy Resin Microcapsules for Self - healing Coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132:440–444. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.015>
14. Wenjing Jiang, Gang Zhou, Cunmin Wang, Yifang Xue, Chenxi Niu. Synthesis and self-healing properties of composite microcapsule based on sodium alginate/melamine-phenol-formaldehyde resin. *Construction and Building Materials*. 2021; 271:121541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121541>
15. Irzhak V.I., Uflyand I.E., Dzhardimalieva G.I. Self-healing of polymers and polymer composites. *Polymers*. 2022; 14(24):5404. <https://doi.org/10.3390/polym14245404>. – EDN: XOKPYG
16. Shebaz J.P.A., Meenakshisundaram O., Subramanian P.G. Review of self-healing strategies contributing to sustainable resilience in polymer composite systems. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2026; 1–26. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2025.2611052>
17. Xiuxiu Liu, Hairui Zhang, Jixiao Wang, Zhi Wang, Shichang Wang. Preparation of epoxy microcapsule based self-healing coatings and their behavior. *Surface and Coatings Technology*. 2012; 206(23):4976–4980. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.133>
18. Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 87:92–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>
19. Navarchian A.H., Najafipoor N., Ahangaran F. Surface-modified poly(methyl methacrylate) microcapsules containing linseed oil for application in self-healing epoxy-based coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132:288–297. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.03.029>
20. Fei Yu, Hengyu Feng, Linghan Xiao, Yu Liu. Fabrication of graphene oxide microcapsules based on Pickering emulsions for self-healing water-borne epoxy resin coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 155:106221. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106221>
21. K. C. Nicolaou Prof. Dr., Scott A. Snyder, Tamsyn Montagnon Dr., Georgios Vassilikogiannakis Dr. The Diels–Alder Reaction in Total Synthesis. *Angewanted Chemie*. 2002; 41(10):1668–1698. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020517\)41:10<1668::aid-anie1668>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020517)41:10<1668::aid-anie1668>3.0.co;2-z)
22. Huertas D., Florscher M., Dragojlovic V. Solvent-free Diels–Alder reactions of in situ generated cyclopentadiene. *Green Chem*. 2009; 11:91–95. <https://doi.org/10.1039/b813485e>
23. Tianhui Liu, Yuzeng Zhao, Yining Deng, Honghua Ge, Preparation of fully epoxy resin microcapsules and their application in self-healing epoxy anti-corrosion coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2024; 188:108247. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108247>
24. Blaiszik B.J., Sottos N.R., White S.R. Nanocapsules for self-healing materials. *Composites Science and Technology*. 2008; 68(3–4):978–986. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.021>. – EDN: KJOSXF
25. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A. Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene. *Nanotechnology in Construction*. 2025; 17(2):189–200. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200> EDN: XIVHFT

26. Tarasevich B.N. *IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials*. Moscow: Lomonosov Moscow State University. 2012;54.

ADDITIONAL INFORMATION

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya I. Cherkashina – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Research Laboratory “Development of Scientific and Technical Foundations for the Creation of Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials”, UNIR, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46, Russian Federation, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Vyacheslav I. Pavlenko – Dr. Sci (Eng.), Professor, Honorary Inventor of the Russian Federation, Head of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46, Russian Federation, pavlenko.v.i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3464-1880>

Sergey V. Serebryakov – Assistant Professor, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Junior Researcher, Research Laboratory “Development of Scientific and Technical Foundations for the Creation of Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials”, 308012, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, 46 Kostyukova St., serebr43@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0284-6647>

Artem Yu. Ruchiy – Research Engineer of the Research Laboratory “Development of Scientific and Technical Foundations for the Creation of Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials”, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46, Russian Federation, artiem.ruchii.99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2617-5624>

Yulia M. Samoylova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Information and Computer Technologies in the Activities of Internal Affairs Bodies, Belgorod Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I.D. Putilin, 308024, Belgorod, Gorky str., 71, Russian Federation, y.samoylova.bel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8750-805X>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

N.I. Cherkashina – scientific guidance; setting the goals and objectives of the study; analysis of the research results; revision of the text of the article.

V.I. Pavlenko – development of research methodology; analysis of research results; conclusions of the article.

S.V. Serebryakov – conducting the experimental part of the study; graphical and tabular presentation of the results; writing the initial text of the article.

A.Y. Ruchiy – conducting the experimental part of the study; analyzing the results of the research.

Yu.I. Samoylova – conducting a literature review; conducting the experimental part of the study.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 21.02.2026; approved after reviewing 28.03.2026; accepted for publication 03.04.2026.

Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания

Наталья Игоревна Черкашина¹ , Вячеслав Иванович Павленко¹ , Сергей Викторович Серебряков¹ ,
Артём Юрьевич Ручий^{1*} , Юлия Михайловна Самойлова² 

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация

² Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И.Д. Путилина, 308024, г. Белгород, ул. Горького 71, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение свойств синтезированного отвердителя для эпоксидной смолы на основе дициклопентадиена и малеинового ангидрида. **Материалы и методы исследования.** Для осуществления синтеза применялись следующие химические реактивы: дициклопентадиен 98%, малеиновый ангидрид (технический), трихлорметан (ХЧ). Исследования проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра Sintecor IR 10, термогравиметрического анализатора STA 449 F1 Jupiter. Расчеты велись с помощью пакета программ QChem и IQmol. **Результаты и обсуждение.** Исследование исходных веществ позволило соотнести расчетные и экспериментальные данные. Последующие операции позволили определить структуру полученного аддукта и его термические характеристики. **Заключение.** В результате работы получен отвердитель для эпоксидных смол, выдерживающий широкий спектр температурного воздействия. Синтезированное вещество найдет практическое применение в самозалечивающихся полимерных композитах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дициклопентадиен, малеиновый ангидрид, реакция Дильса-Альдера, полимерный композит, ИК-Фурье спектроскопия, термогравиметрия, теория функциональной плотности

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10033 <https://rscf.ru/project/24-79-10033/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Черкашина Н.И., Павленко В.И., Серебряков С.В., Ручий А.Ю., Самойлова Ю.М. Синтез активного вещества для микрокапсул в полимерном композите с эффектом самозалечивания. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):210–231. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-210-231>. – EDN: XWXZHG.

Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect

Natalia I. Cherkashina¹ , Vyacheslav I. Pavlenko¹ , Sergey V. Serebryakov¹ , Artem Yu. Ruchiy^{1*} ,
Yulia M. Samoylova² 

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46, Russian Federation

² Belgorod Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I.D. Putilin, 71 Gorky St., Belgorod, 308024, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to examine the properties of a synthesized epoxy resin hardener based on dicyclopentadiene and maleic anhydride. **Materials and methods.** The following chemical reagents were used for synthesis: dicyclopentadiene 98%, maleic anhydride (technical), trichloromethane (C.P.). The research was carried out with the Sintecor IR 10 FTIR spectrometer, the STA 449 F1 Jupiter thermogravimetric analyzer. **Results and discussion.** Studying the initial substances allowed the calculated and experimental data to be correlated. Subsequent operations then revealed the structure and thermal properties of the obtained adduct. **Conclusion.** As a result of this research, an epoxy resin hardener has been obtained that can withstand a wide range of temperature variations. The synthesized substance is expected to find practical application in self-healing polymer composites.

KEYWORDS: dicyclopentadiene, maleic anhydride, Diels-Alder reaction, polymer composite, FT-IR spectroscopy, thermogravimetry, functional density theory

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No 24-79-10033 <https://rscf.ru/project/24-79-10033/> using equipment on the basis of the Center for High Technologies of BSTU named after V. G. Shukhov.

FOR CITATION:

Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Serebryakov S.V., Ruchiy A.Yu., Samoylova Yu.M. Synthesis of an active substance for microcapsules in a polymer composite with a self-healing effect. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(2):210–231. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-210-231>. – EDN: XWXZHG.

ВВЕДЕНИЕ

Современные автономные системы самозалечивания являются одним из ключевых направлений повышения долговечности полимерных композиций, широко применяемых в строительстве, авиации, энергетике, медицине и космической отрасли. В условиях эксплуатации образуются мелкие механические повреждения, которые приводят к снижению эксплуатационных свойств и долговечности материала [1–4]. Микрокапсулированные активные вещества, высвобождаемые локально при повреждении, инициируют реакционные процессы полимеризации, восстанавливая целостность структур и часть прочностных характеристик [5–10].

Самозалечивание (самовосстановление) искусственных материалов представляет собой частичное или полное уменьшение площади повреждений за счет массопереноса и консолидации границ трещин, что приводит к частичному или полному восстановлению функциональных свойств материала. В таких системах консолидация повреждений (самозалечивание) наступает после сведения трещин, обеспечиваемого переносом масс [11, 12]. Процессы могут развиваться автономно (например, за счет течения вещества внутри материала) или неавтономно, когда залечивание инициируется внешними воздействиями, такими как повышение температуры или ультрафиолетовое излучение [13, 14]. По организации самовосстановления их механизмы делят на внешние и внутренние. Внешний механизм опирается на специально внедренные в матрицу восстанавливающие компоненты, напри-

мер, микрокапсулы с залечивающими веществами, тогда как внутренние механизмы не требуют наличия дополнительных восстанавливающих составов [15–22].

Настоящая работа посвящена синтезу активного вещества на основе реакции Дильса-Альдера между дициклопентадиеном (ДЦПД) и малеиновым ангидридом (МА). В результате реакции будет происходить залечивание трещин в полимерных композитах. Данное взаимодействие представляет собой классическое (4+2)-циклоприсоединение, в котором малеиновый ангидрид выступает в роли высокоэффективного диенофила. Благодаря двум электроноакцепторным карбонильным группам, снижающим энергию НСМО, он способен реагировать с широким спектром сопряженных диенов, образуя соответствующие ангидриды.

В частности, малеиновый ангидрид легко вступает в реакцию как с ациклическими диенами (бутадиен, изопрен), так и с циклическими структурами, включая циклопентадиен и полициклические ароматические соединения наподобие антрацена [23, 24]. Именно такая высокая реакционная способность делает его идеальным кандидатом для конструирования молекулярных блоков, необходимых при создании современных функциональных материалов с самозалечивающимися свойствами.

Потребность в подобных синтезах продиктована практическими задачами материаловедения. В условиях, где получение устойчивых двухкомпонентных эпоксидных пластиков затруднено из-за внешних факторов (температуры, влажности), возникает необходимость в предварительно синтезированных стабильных отвердителях.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы

В ходе работы использовались следующие реактивы: дициклопентадиен ($C_{10}H_{12}$) 98% производства АСМЕС biomechanical Co.ltd Шанхай; трихлорметан ($CHCl_3$) ХЧ производства АО «ЭККОС-1», Москва; малеиновый ангидрид ($C_4H_2O_3$) технический.

Оборудование и методы исследования

DFT-расчеты проводились с помощью программы QChem 6.4 и интерпретировались в программе IQmol 3.1.5.

Съемка ИК-Фурье спектров соединений проводилась на Sintecor IR 10 в диапазоне волновых чисел $470\text{--}4000\text{ см}^{-1}$.

Термогравиметрический анализ соединений проводился на приборе STA 449 F1 Jupiter. Образцы нагревались от 20 до 400 °C со скоростью 10 град/мин в следующей атмосфере: $21\% O_2$, $79\% Ar$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Экспериментальная часть

В работе [25], посвященной разработке капсул с залечивающим содержимым для композитов, не было уделено должного внимания веществу, выступающему в роли активного вещества для инициирования химической реакции.

Дициклопентадиен (рис. 1а) представляет собой высоконапряженную молекулу с норборненовым

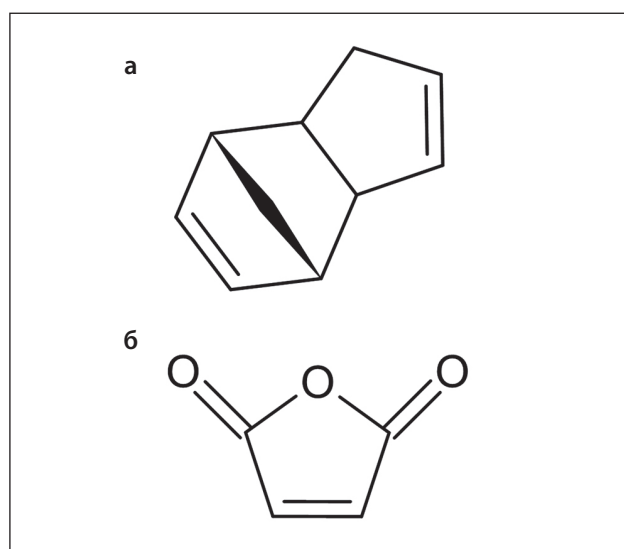


Рис. 1. Структурная формула: а) ДЦПД; б) МА

основанием и прилегающим к нему циклопентеновым кольцом. В нормальных условиях представляет собой вязкую жидкость с резким запахом. В целом, в качестве отвердителей двухкомпонентных эпоксидных систем используются органические ангидриды и амины. В настоящей работе в качестве реакционного радикала выбор остановился на ангидридном окончании молекулы. В качестве прекурсора использовался малеиновый ангидрид (рис. 1б).

В проведении реакции важно соблюдать температурный режим (не превышающий 80 °C), так как при высоких температурах дициклопентадиен распадается на 2 молекулы циклопентадиена. Однако реакция Дильса-Альдера не требует высоких температур.

В ранних работах чаще всего для проведения реакции Дильса-Альдера с применением дициклопентадиена использовались высокие температуры ($160\text{--}200\text{ °C}$) [21].

Реакция Дильса-Альдера строится на способности диенофилов присоединяться к диенам с низкой плотностью молекулярной орбитали. Молекулярные плотности были рассчитаны с помощью программы QChem. Расчеты проводились по методу Хартри-Фока (ХФ), являющемуся приближенным решением уравнения Шредингера. На рисунке 2 представлена модель молекулярных орбиталей малеинового ангидрида.

Параметры молекулы задаются в формате FChk. Пространственные координаты молекулы представлены в таблице 1.

Базис для квантово-химических расчетов — 6-31G, так как данный базис отлично подходит для

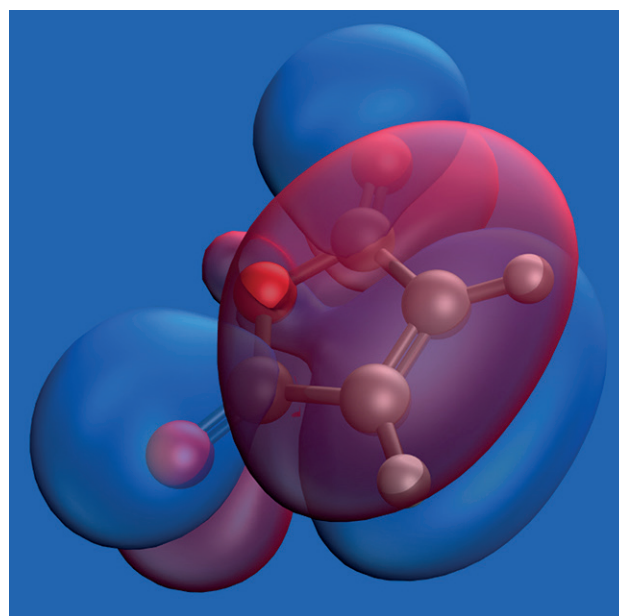


Рис. 2. Модель молекулы малеинового ангидрида с выделенными молекулярными орбиталями

Таблица 1. Пространственные координаты молекулы МА

01*			
Атом	x	y	z
C	0,6623095	-1,2489674	0,0000000
C	-0,6623106	-1,2489670	0,0000000
C	-1,1376593	0,1599721	0,0000000
C	1,1376590	0,1599714	0,0000000
O	0,0000001	0,9570981	0,0000000
O	2,2470393	0,5977750	0,0000000
O	-2,2470392	0,5977764	0,0000000
H	1,3356524	-2,0762104	0,0000000
H	-1,3356540	-2,0762096	0,0000000

* обозначение количества объектов в области координат (0 – свободное пространство, 1 – молекула)

расчетов систем средней сложности, не содержащих тяжелых атомов.

Модель, построенная по методу Хартри-Фока, дает не самое точное представление о структуре и поведении молекулы, так как упрощает ее до совокупности внешних оболочек атомов молекул, игнорируя вклад внутренних электронов. Квантовая система, полученная по методу ХФ, соотносится с экспериментальными данными.

Также произведено моделирование молекулярных орбиталей дициклопентадиена. Результат представлен на рисунке 3.

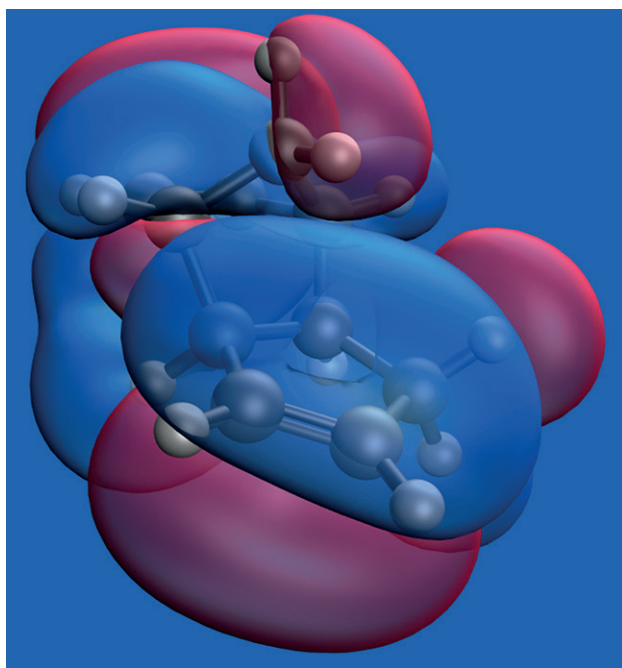


Рис. 3. Модель молекулы дициклопентадиена с выделенными молекулярными орбиталями

Пространственные координаты молекулы дициклопентадиена представлены в таблице 2.

Реакция между дициклопентадиеном и малеиновым ангидридом проводилась в высушенном хлороформе в среде азота. Как предусматривает механизм Дильса-Альдера (рис. 4), реакция проходит без переходных состояний с разрывом двойных связей при низкой энергии активации.

Особенность реакции Дильса-Альдера заключается в том, что она проходит преимущественно с ароматическими циклами. Расчетный ЯМР-спектр дициклопентадиена (рис. 5) указывает на ароматичность данного соединения. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Результаты расчета указывают на смещение спектра в область ~ 8 и ~ 7 ppm, что отвечает условиям ароматичности соединения.

Контроль за ходом реакции проводился с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Анализ проводился с помощью спектрометра Sintecor IR10 в таблетках из бромного калия.

В ИК-Фурье спектрах малеинового ангидрида (рис. 6, табл. 4) прослеживаются моды, характерные для ароматических гетероциклов (~ 1240 и ~ 1059 см⁻¹), также стоит подчеркнуть, что полученные спектры идентичны указанным в литературном источнике [26].

В ИК-Фурье спектрах дициклопентадиена (рис. 7, табл. 5) прослеживаются колебательные моды, характерные для циклических соединений с наличием двойных связей.

ИК-Фурье спектр аддукта дициклопентадиена и малеинового ангидрида (рис. 8, табл. 6) имеет мало общих мод с начальными соединениями. Это связано со сложной трехмерной геометрией аддукта в совокупности с разнообразием конформаций соединения.

Таблица 2. Пространственные координаты молекулы ДЦПД

01			
Атом	x	y	z
C	2,4796350	0,1410729	-0,0683041
C	1,6804108	1,1941252	0,1057580
C	1,7488112	-1,1630978	0,0926355
C	0,3643315	-0,7244309	0,4318390
C	0,3472054	0,7291123	0,4609470
C	-0,8958314	1,0722448	-0,2545958
C	-0,8628465	-1,0467290	-0,3273888
C	-2,0541842	-0,7067548	0,4813796
C	-2,0739739	0,6378653	0,5295530
C	-0,8910027	0,0509215	-1,3260295
H	3,4853189	0,2129811	-0,2884243
H	1,9620733	2,1817942	0,0047628
H	2,1725093	-1,7477525	0,8822929
H	1,7956651	-1,7857229	-0,7762965
H	0,2584193	-1,3209837	1,3137729
H	0,2439873	1,2754131	1,3751688
H	-0,9388543	2,1120129	-0,5034561
H	-0,8677873	-2,0639699	-0,6591968
H	-2,7252416	-1,3599432	0,9150281
H	-2,7627270	1,2376484	1,0100771
H	-0,0244552	0,0867506	-1,9526967
H	-1,6542394	0,0657942	-2,0757952

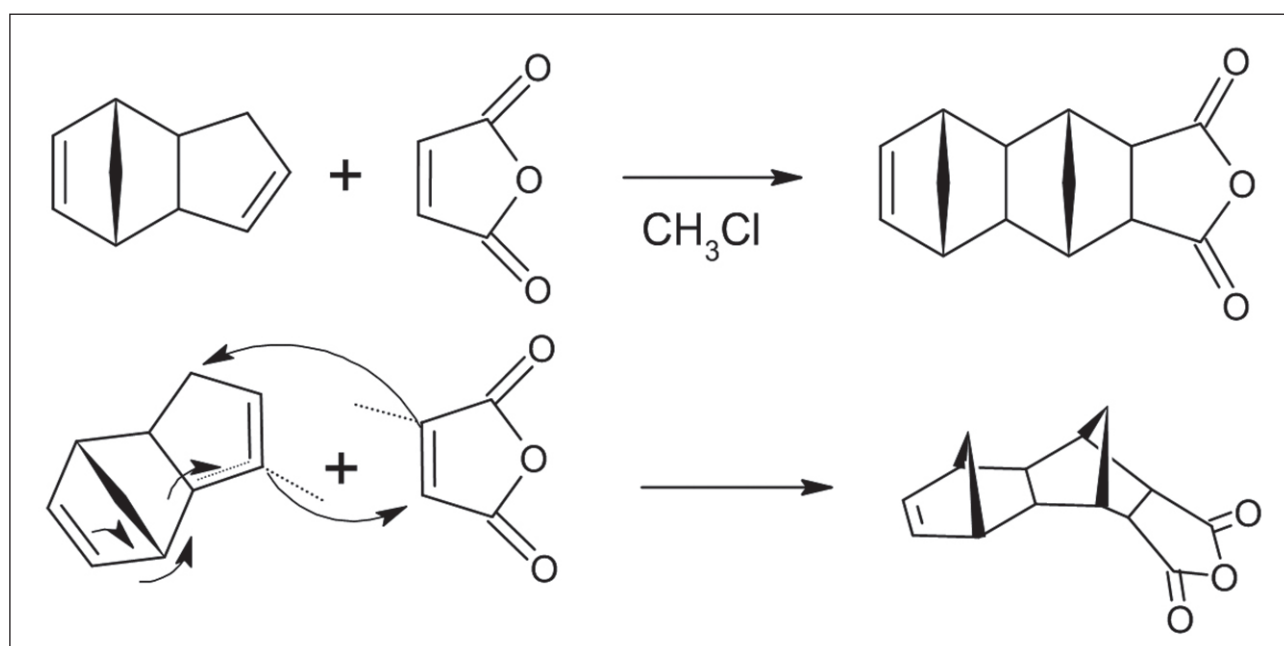
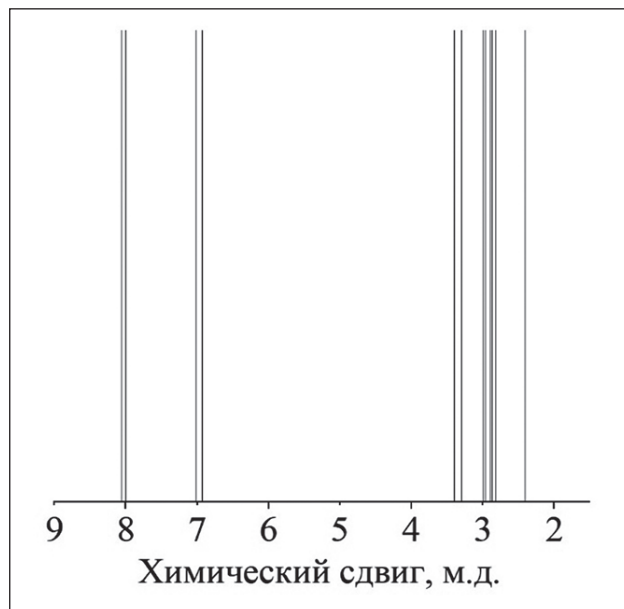


Рис. 4. Механизм реакции Дильса-Альдера для ДЦПД и МА

Таблица 3. Значения магнитного резонанса атомов водорода в ДЦПД

Атом	Химический сдвиг, м.д.											
	1H	6,93	7,01	3,30	2,82	2,99	3,40	2,96	2,87	8,06	8,00	2,90

**Рис. 5.** Рассчитанный ЯМР-спектр ДЦПД

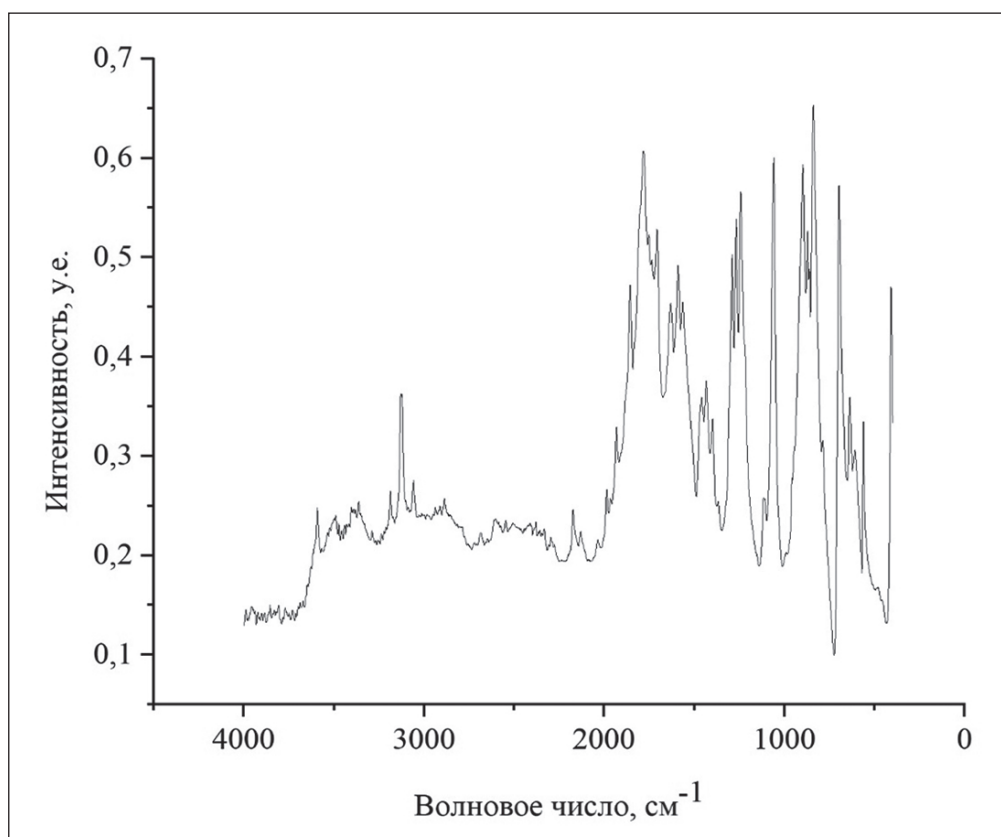
На рисунке 9 наглядно видно несоответствие колебательных мод аддукта и исходных соединений (ДЦПД и МА), что непосредственно указывает на образование нового соединения.

2. Расчетная часть

Для подтверждения результатов синтеза были проведены расчеты частот колебаний молекулярных связей. Известно, что на каждую частоту коле-

Таблица 4. Расшифровка колебательных мод МА

Область поглощения, см ⁻¹	Характеристика
1853	ν C=O (в циклических ангидридах)
1782	ν C=O (в циклических ангидридах)
1632	C=C (сопряженное с C=O)
1240	ароматические и винильные (=C–O–C–)
1059	ароматические и винильные (=C–O–C–)

**Рис. 6.** ИК-Фурье спектр малеинового ангидрида

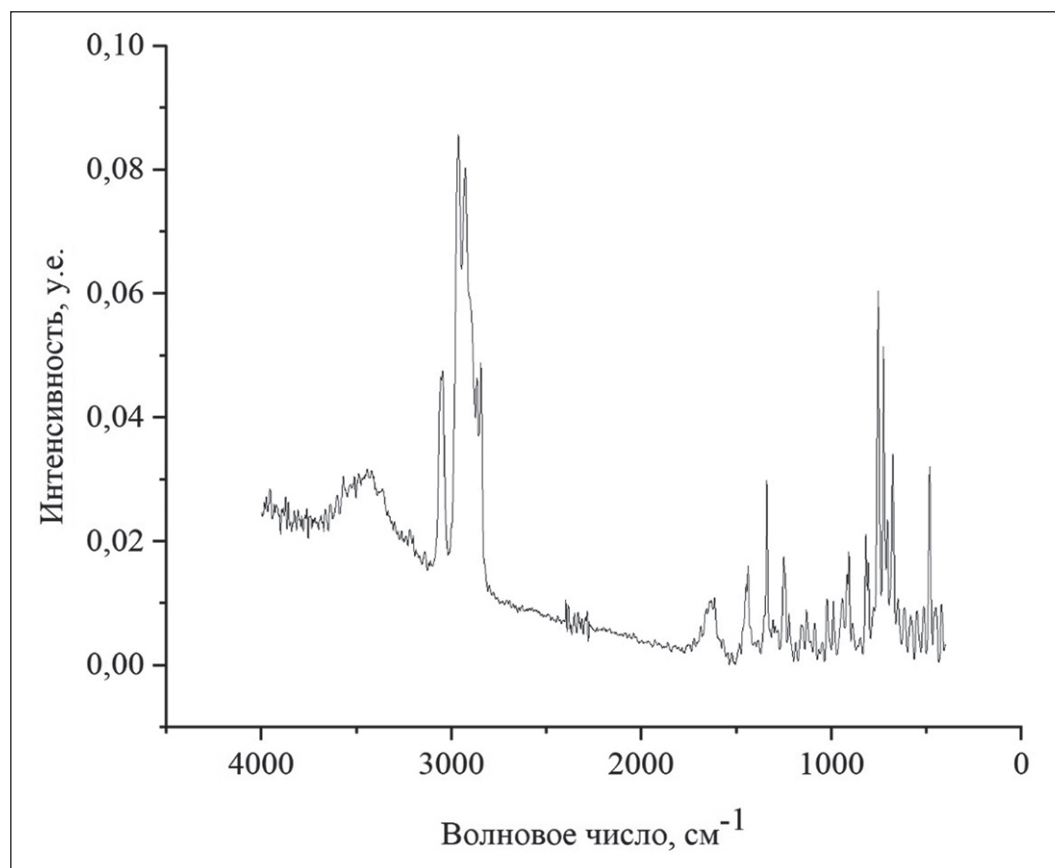
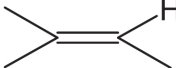


Рис. 7. ИК-Фурье спектр дициклопентадиена

Таблица 5. Расшифровка колебательных мод ДЦПД

Область поглощения, см ⁻¹	Характеристика
3048	ν as HRC=CH ²
2962	-CH ² -
2924	-CH ² -
2844	-CH ² -
1439	-CH ² -
1336	=CH
1250	δ (ar C-H)ip (плоскостное колебание)
912	δ C=C
815, 750, 728, 680	

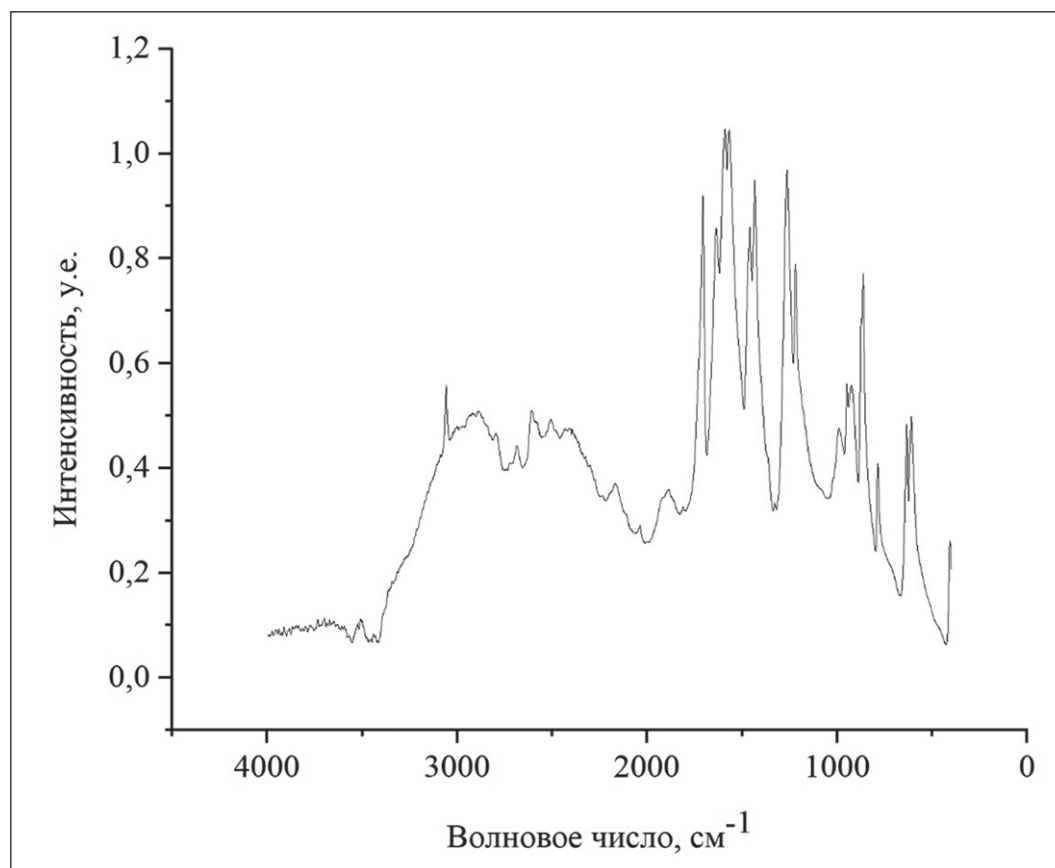


Рис 8. ИК-Фурье спектр аддукта ДЦПД и МА

Таблица 6. Расшифровка колебательных мод аддукта ДЦПД и МА

Область поглощения, см ⁻¹	Характеристика
3062	ν as HRC=CH ₂
1708	Альдегиды ароматические
1585	ν ar
1429	CH ₂ -C=O
1265	Эфир ароматических кислот
1215	ν C-O st

бания связи имеется свой тензор сдвига, зависящий от плотности связей и смещающий частоту излучения. Тензор сдвига подбирался на основе подбора реальных и расчетных данных ИК-Фурье спектров исходных веществ. Полученный коэффициент пропорциональности (scale factor) составил 0,905 как для дициклопентадиена (рис. 10, табл. 7), так и для малеинового ангидрида (рис. 11, табл. 8) и выставился по самым интенсивным модам.

Обращаясь к планированию эксперимента, нужно отметить, что формула полученного соединения должна содержать два совмещенных норборненорвых кольца с ангидридным придатком (рис. 12).

Однако полученные данные ИК-Фурье спектроскопии (рис. 13) не до конца сходятся с расчетными данными (табл. 9–12), что указывает на получение смеси веществ. А именно на наличие в смеси доли гидролизованного до карбоновой кислоты

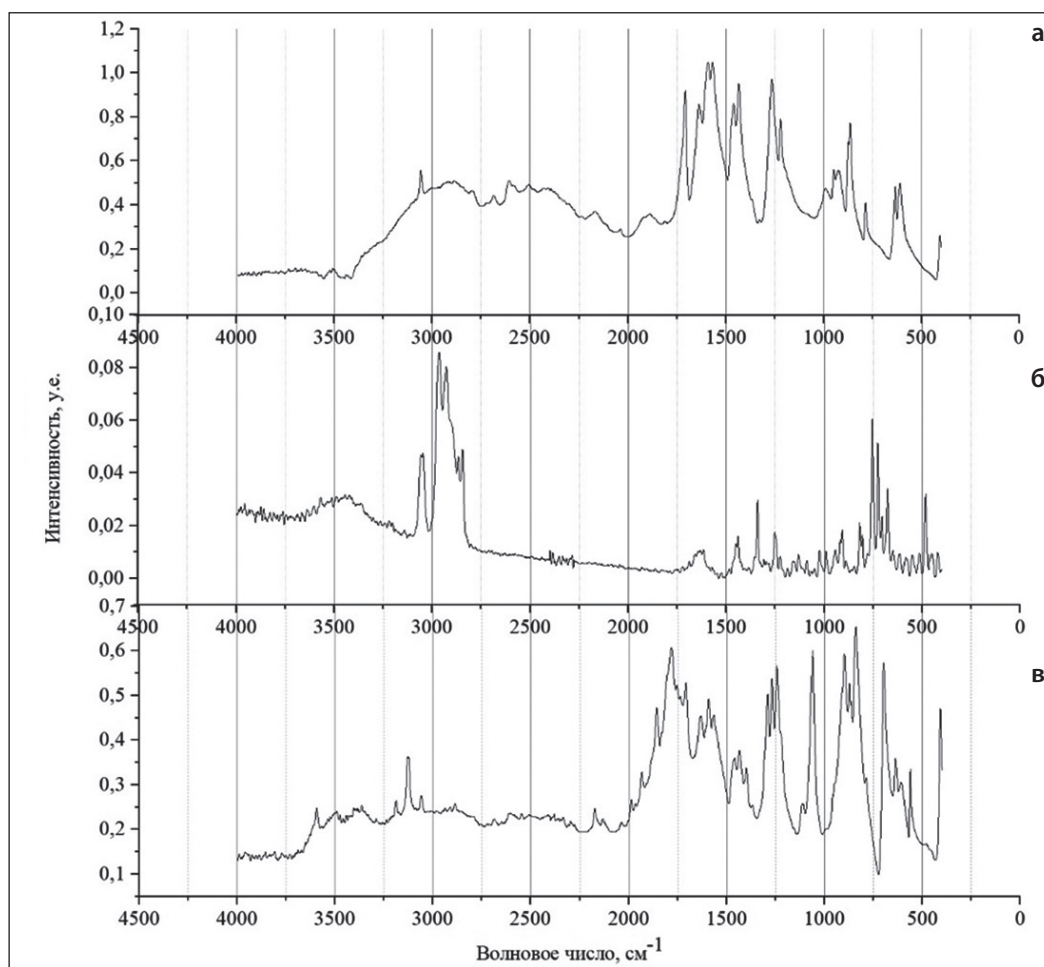


Рис. 9. Сравнение ИК-Фурье спектров: а) аддукт; б) ДЦПД; в) МА

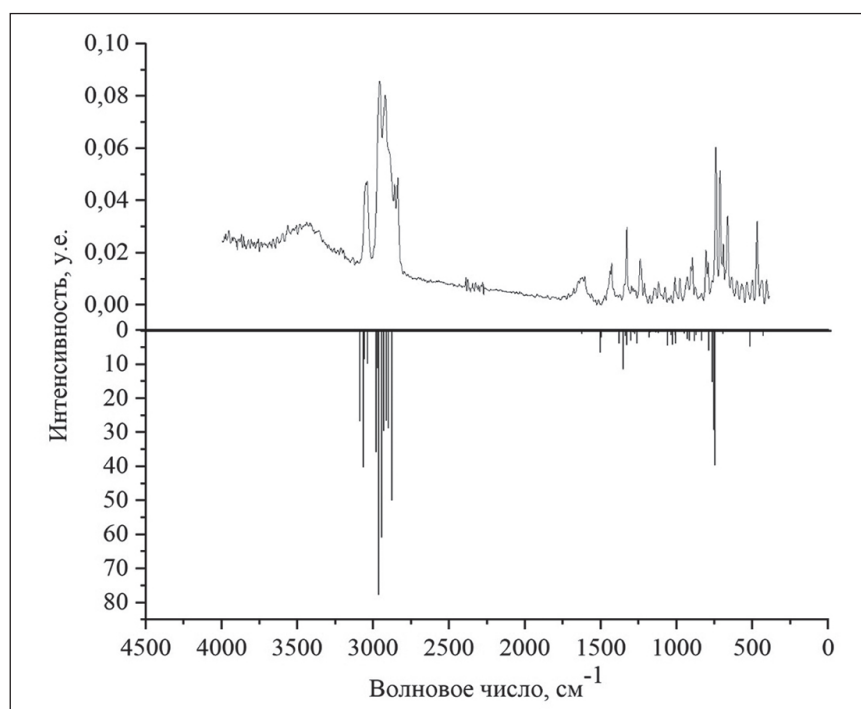


Рис. 10. Наглядное соотношение экспериментальных (сверху) и расчетных (снизу) колебательных мод ДЦПД

Таблица 7. Расчетные значения ИК-Фурье спектроскопии для ДЦПД

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
428,05	1,538	12832,61616
443,84	0,256	13305,98846
514,62	4,706	15427,91947
634,13	0,337	19010,73914
691,25	0,952	20723,15366
745,55	39,513	22351,02671
754,86	29,19	22630,13348
763,49	15,155	22888,85438
788,49	5,915	23638,33552
834,86	2,925	25028,47315
871,33	1,31	26121,81624
881,14	3,061	26415,91264
892,25	0,095	26748,98207
915,66	2,874	27450,79621
929,45	2,451	27864,21001
949,67	0,896	28470,39036
975,62	0,096	29248,35179
1004,6	3,812	30117,15033
1008,56	1,351	30235,86814
1023,96	4,053	30697,54853
1034,88	1,31	31024,92189
1037,16	1,296	31093,27457
1058,63	4,365	31736,92898
1118,38	0,705	33528,18892
1125,83	0,311	33751,5343
1138	0,547	34116,38172
1173,75	0,63	35188,13976
1180,26	2,096	35383,30465
1207,66	0,27	36204,73598
1261,29	3,746	37812,52294
1274,11	1,019	38196,85687
1282,7	0,536	38454,37859
1299,4	2,922	38955,03199
1304,4	0,133	39104,92822
1327,05	4,215	39783,95814
1337,37	1,656	40093,34396
1339,31	0,27	40151,50369
1350,23	11,368	40478,87706
1377,01	3,887	41281,72126
1495,96	2,045	44847,75255
1502,75	6,502	45051,31163
1623,81	0,939	48680,59912
1667,57	0,3	49992,49092
2876,06	49,931	86222,10968
2900,43	28,764	86952,7039
2911,82	26,492	87294,16751
2930,43	29,431	87852,08127
2944,63	60,856	88277,78656
2963,09	77,664	88831,20344
2970,26	11,14	89046,15463
2979,99	35,781	89337,85269
3037,22	9,784	91053,56493
3058,85	8,456	91702,01602
3065,99	40,144	91916,06783
3087,53	26,654	92561,82078

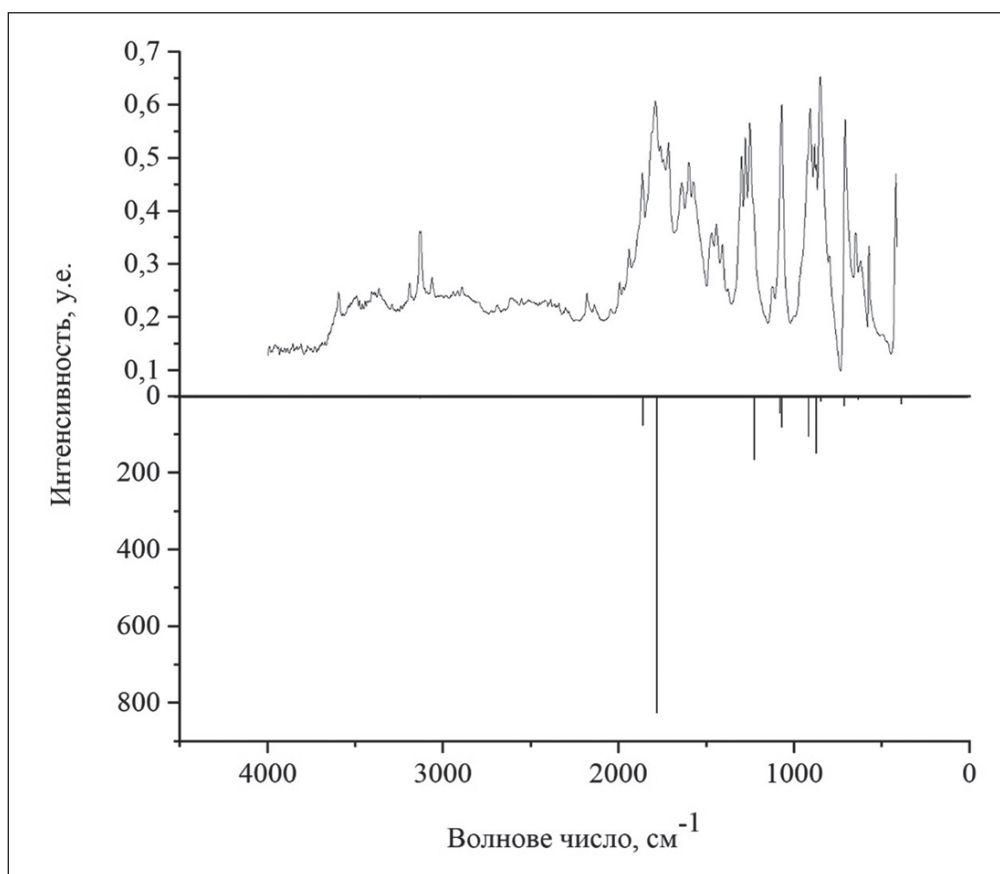


Рис. 11. Наглядное соотношение экспериментальных (сверху) и расчетных (снизу) колебательных мод МА

Таблица 8. Расчетные значения ИК-Фурье спектроскопии для МА

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
389,58	20,435	11679,31458
541,85	2,723	16244,25434
624,48	1,143	18721,43942
634,17	8,008	19011,93831
715,12	25,234	21438,75826
848,37	12,421	25433,49276
873,53	148,693	26187,77058
916,46	104,567	27474,77961
1069,96	80,398	32076,59384
1078,17	43,965	32322,72344
1225,12	165,313	36728,17361
1336,65	1,2	40071,7589
1634,12	0,78	48989,68515
1781,76	824,756	53415,821
1860,36	75,998	55772,18972
3132,14	5,095	93899,19494
3153,54	2,576	94540,7508

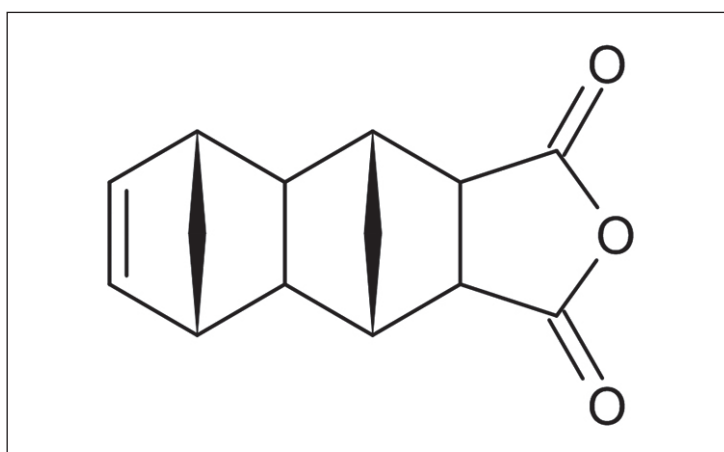


Рис. 12. Структурная формула аддукта

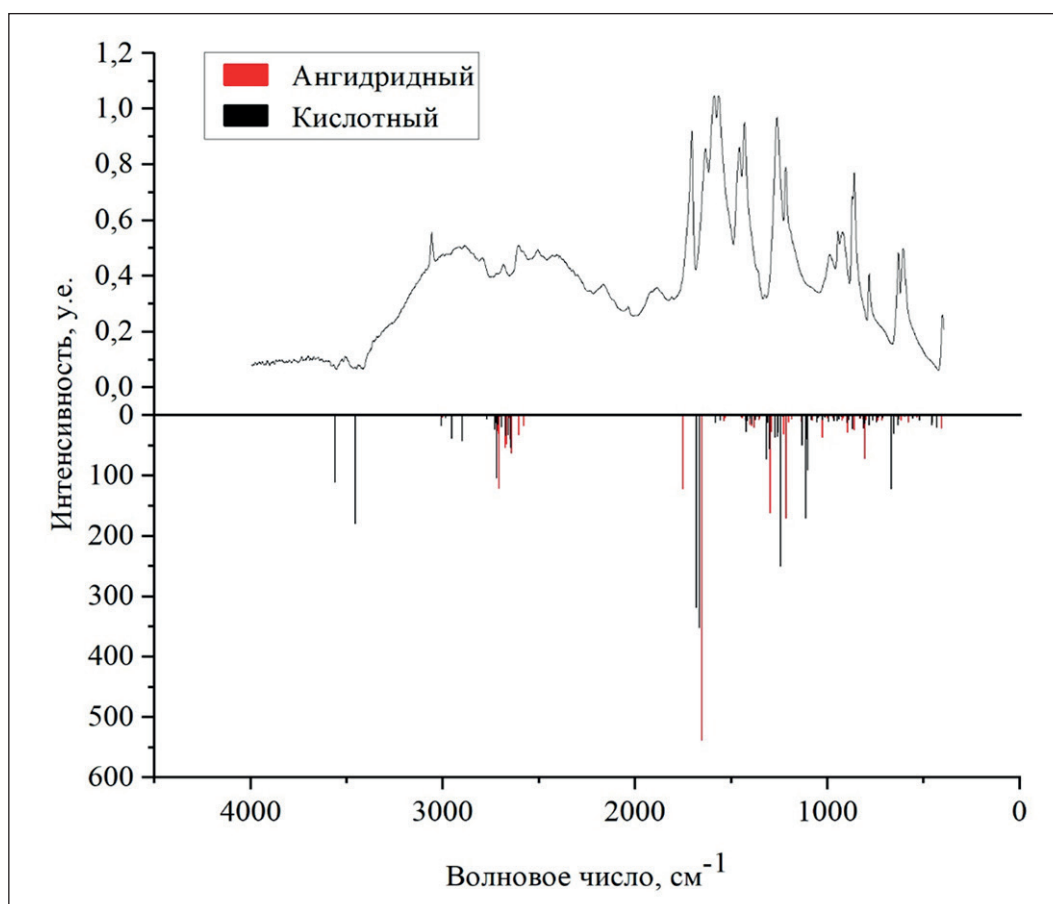


Рис. 13. Наглядное соотношение экспериментальных (сверху) и расчетных (снизу) колебательных мод аддукта

ангидрида, а также на неполную сходимость повлияло наличие различных конформаций соединений.

Молекула кислотного аддукта (рис. 11) представляет собой нелинейную молекулу, значит, количество допустимых мод удовлетворяет формуле $3N-6$ (где N -количество атомов в молекуле).

По моделям, представленным на рис. 14 и 15, прослеживается сложное пространственное строение молекул кислотного и ангидридного аддуктов, что в перспективе увеличит прочность на разрыв и сжатие конечных эпоксидных структур за счет скручивания полимерных цепочек. Также прослеживается

Таблица 9. Пространственные координаты кислотного аддукта

01			
Атом	x	y	z
C	2,9315102	-0,4174406	1,6091419
C	3,0254627	0,9295588	1,3136708
C	2,5569832	1,0810698	-0,1118783
C	2,4354607	-1,0829987	0,3549941
C	1,0075778	0,8395233	-0,0474390
C	0,9366974	-0,6749013	0,1934086
C	3,1804623	-0,2181038	-0,6485449
C	0,0885279	1,0442277	-1,2931481
C	0,1326389	-1,1619874	-1,0557912
C	0,4111278	-0,1415290	-2,1722666
C	-1,3729620	-0,8532875	-0,8165288
C	-1,3983933	0,7122421	-0,9406452
C	-1,9957753	-1,6446249	0,3355181
C	-2,0030276	1,5651346	0,1580316
O	-1,7881948	-2,8468094	0,3722530
O	-2,9465504	2,2957288	-0,1068009
H	3,2705296	-0,8883887	2,5219852
H	3,4448724	1,6890988	1,9595683
H	2,8475685	2,0572784	-0,5530969
H	2,6120350	-2,1790877	0,3454574
H	0,6533427	1,4831682	0,7777780
H	0,4022466	-0,9818845	1,1194377
H	4,2915592	-0,2513373	-0,5230865
H	3,0402717	-0,5105674	-1,6868551
H	0,1937191	2,0531199	-1,7463991
H	0,2912302	-2,2359798	-1,2932265
H	1,3958228	-0,0862649	-2,6267948
H	-0,2666615	-0,2484397	-3,0524763
H	-1,8902733	-1,2555622	-1,7204702
H	-1,9918819	0,9341792	-1,8604735
O	-1,5394470	1,5213264	1,4257724
O	-2,8230620	-1,1274285	1,2703571
H	-1,9304899	2,0635870	2,1254570
H	-3,2036012	-0,2467562	1,2494032

Таблица 10. Расчетные значения ИК-Фурье спектроскопии для кислотного аддукта

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
422,57	20,269	12668,3299
447,17	11,099	13405,81934
450,67	16,077	13510,7467
512,86	7,682	15375,156
549,09	5,115	16461,30408
623,69	4,113	18697,75581
624,58	15,528	18724,43734
648,84	29,641	19451,73384
659,62	121,386	19774,91011
705,31	3,605	21144,66186
728,38	2,813	21836,28306
736,44	11,004	22077,91578
758,08	8,117	22726,66666
776,43	16,301	23276,78582
797,25	12,662	23900,95371
803,67	20,553	24093,42047
820,49	4,897	24597,67139
839,18	1,083	25157,98349
860,86	22,029	25807,93354
881,8	6,678	26435,69895
891,52	12,292	26727,09722
918,94	2,097	27549,12814
930,99	5,779	27910,37805
941,31	8,886	28219,76386
957,17	9,116	28695,2347
964,13	0,214	28903,89025
972,71	0,519	29161,11218
978,42	0,533	29332,29368
986,96	9,955	29588,31643
1007,62	2,311	30207,68765
1017,83	6,729	30513,77575
1029,65	0,059	30868,13044
1041,28	3,848	31216,78907
1047,66	10,789	31408,05665
1075,43	7,279	32240,58031
1096,16	90,5	32862,05008
1100,02	38,732	32977,76996
1104,11	170,566	33100,38508
1124,34	48,975	33706,86522
1160,94	1,009	34804,10562
1173,06	0,653	35167,45408
1223,67	1,858	36684,70371
1235,77	250,109	37047,45258
1248,66	27,666	37433,88506
1252,76	34,813	37556,79997
1266,45	36,227	37967,21584
1295,06	55,499	38824,92207
1304,86	11,617	39118,71867
1308,39	72,373	39224,54541
1323,08	0,9	39664,94053
1327,07	1,115	39784,55772
1344,79	0,713	40315,78996
1348,62	1,393	40430,61047
1356,6	1,303	40669,84485

Продолжение таблицы 10

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
1366,65	6,555	40971,13627
1382,97	0,399	41460,39756
1385,78	14,103	41544,63924
1396,3	4,341	41860,02091
1408,07	8,986	42212,87663
1414,65	26,854	42410,14007
1419,76	8,025	42563,33402
1441,9	1,849	43227,07452
1472,23	0,511	44136,34504
1548,59	7,743	46425,56025
1576,03	12,235	47248,19076
1658,89	351,456	49732,27107
1674,47	318,638	50199,34771
2641,04	4,868	79176,38733
2641,32	52,917	79184,78152
2652,92	31,788	79532,54077
2665,56	33,243	79911,47843
2687,34	18,641	80564,42641
2705,95	14,62	81122,34017
2712,14	103,301	81307,9117
2715,66	11,926	81413,43865
2721,45	23,145	81587,01848
2765,65	5,958	82912,10115
2893,39	42,332	86741,65001
2946,02	37,782	88319,45771
2979,68	3,343	89328,55913
3001,52	17,068	89983,30585
3447,18	179,288	103343,85654
3553	110,917	106516,26033

Таблица 11. Пространственные координаты ангидридного аддукта

01			
Атом	x	y	z
C	1,3141048	-0,8258545	0,7555059
C	1,8636569	0,5797013	1,1233108
C	1,3136704	-0,8260783	-0,7556297
C	0,9459339	1,6700943	0,6886091
C	0,9453752	1,6699677	-0,6888182
C	1,8627855	0,5794921	-1,1241021
C	2,9091976	0,7381951	-0,0008188
C	-0,0067794	-1,5607134	1,1291011
C	-0,0072583	-1,5613396	-1,1282846
C	0,0056923	-2,6205850	0,0007008
C	-1,3502770	-0,8831259	-0,7584379
C	-1,3499481	-0,8826069	0,7593555
C	-1,6585750	0,5329433	-1,0952327
C	-1,6581462	0,5337199	1,0952492
O	-1,8547783	1,2974647	-0,0002341

Продолжение таблицы 11

01			
Атом	x	y	z
O	-1,7655017	0,9622375	-2,2325926
O	-1,7646851	0,9638282	2,2323242
H	2,1217957	-1,5260150	1,0874806
H	2,1868443	0,6667752	2,1819437
H	2,1212860	-1,5262038	-1,0878534
H	0,4548516	2,4031158	1,3144979
H	0,4537700	2,4029058	-1,3143913
H	2,1851463	0,6664242	-2,1829953
H	3,7010840	-0,0469545	-0,0010657
H	3,4147047	1,7347850	-0,0011056
H	0,0020068	-1,9061375	2,1848889
H	0,0011191	-1,9073439	-2,1838870
H	-0,8832067	-3,2961578	0,0010851
H	0,9121854	-3,2713050	0,0006845
H	-2,1844541	-1,5229043	-1,1293408
H	-2,1840079	-1,5220869	1,1310275

Таблица 12. Расчетные значения ИК-Фурье спектроскопии для ангидридного аддукта

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
410,34	20,798	12301,68372
447,04	0,108	13401,92204
452,81	0,34	13574,90229
512,65	0,083	15368,86036
540,11	2,66	16192,09045
583,31	11,284	17487,19387
603,5	2,094	18092,47484
623,11	7,605	18680,36785
634,16	5,53	19011,63852
649,2	2,209	19462,52637
704,06	0,195	21107,1878
722,3	8,026	21654,00924
743,4	7,966	22286,57133
803,65	6,472	24092,82089
812,01	71,561	24343,44738
822,12	5,752	24646,53756
836,74	4,914	25084,83413
850,63	1,196	25501,24585
866,8	23,662	25986,01026
888,17	0,285	26626,66674
900,77	27,931	27004,40524
924,88	3,645	27727,20486
930,61	7,682	27898,98593
943,97	0,001	28299,50866
977,26	3,81	29297,51775
978,09	0,077	29322,40052
1001,16	3,327	30014,02173
1006,85	4,062	30184,60363

Продолжение таблицы 12

Частота, см ⁻¹	Интенсивность, КМ/моль	Частота, Гц
1030,99	35,867	30908,30263
1050,49	1,817	31492,89792
1059,63	8,584	31766,90823
1060,77	1,805	31801,08457
1082,62	7,888	32456,13109
1086,62	2,614	32576,04807
1116,28	0,009	33465,2325
1140,17	9,58	34181,43668
1190,55	2,941	35691,79109
1190,79	5,585	35698,98611
1207,73	11,332	36206,83453
1221,86	170,62	36630,44127
1232,36	30,557	36945,22335
1247,26	0,763	37391,91412
1252,95	0,017	37562,49603
1277,51	6,069	38298,7863
1297,27	26,617	38891,1762
1304,24	160,98	39100,13154
1319,25	2,267	39550,12002
1323,33	9,511	39672,43534
1348,88	0,154	40438,40507
1353,42	0,543	40574,51085
1358,26	4,683	40719,6104
1359,97	6,721	40770,87491
1376,71	0,099	41272,72749
1378,17	0,068	41316,49718
1388,08	20,313	41613,59151
1399,99	16,719	41970,64433
1410	14,426	42270,73658
1428,49	0,831	42825,05283
1449	3,392	43439,92716
1450,76	3,7	43492,69064
1490,06	0,136	44670,875
1538,8	3,651	46132,06344
1542,11	9,08	46231,29474
1659,2	538,551	49741,56463
1757,81	122,141	52697,81806
2585,12	16,98	77499,9479
2612,64	32,105	78324,97675
2650,31	62,449	79454,29494
2655,43	38,88	79607,78867
2659,4	3,407	79726,80628
2674,23	46,842	80171,3985
2676,19	3,902	80230,15782
2683,17	53,369	80439,41295
2711,71	1,28	81295,02063
2714,1	120,37	81366,67103
2717,61	29,596	81471,89818
2721,58	24,989	81590,91578
2986,73	0,033	89539,91281
3006,64	2,433	90136,79959

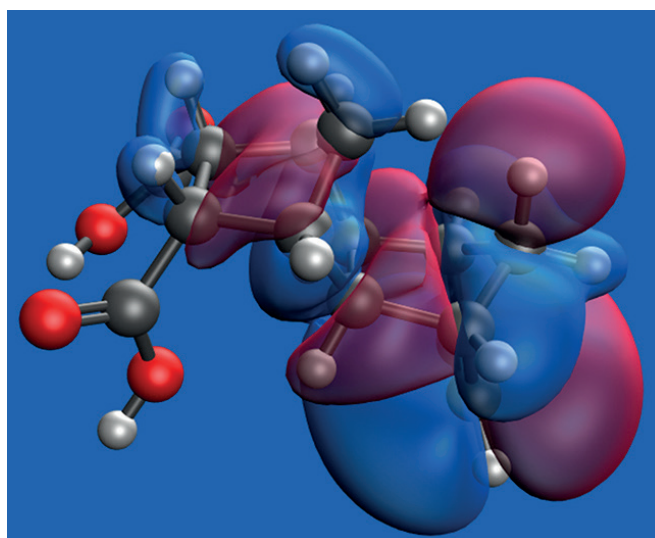


Рис. 14. Модель молекулы кислотного аддукта с выделенными молекулярными орбиталями

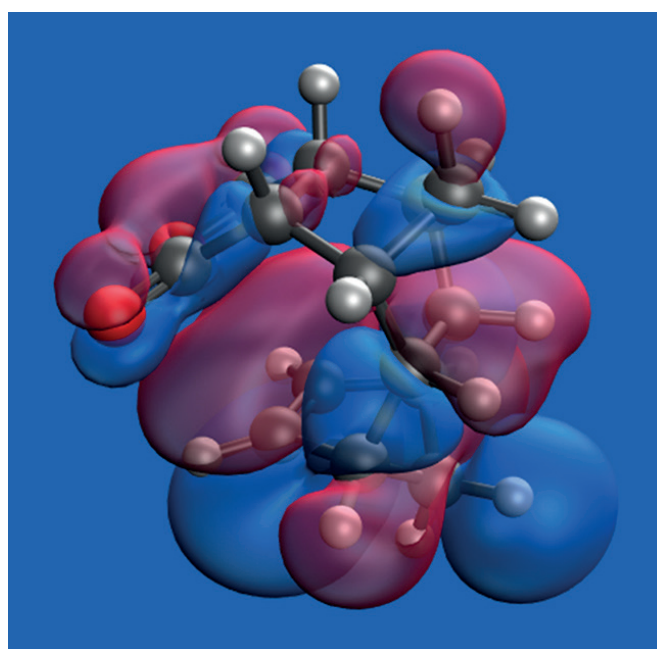


Рис. 15. Модель молекулы ангидридного аддукта с выделенными молекулярными орбиталями

возможности для получения иных конформаций соединений.

Одним из главных эксплуатационных свойств материала является стойкость к повышенным температурам. Как следует из данных рис. 16, МА обладает низкой термостойкостью и подвержен структурным превращениям. Заметная деструкция начинается со 100–110 °С. Исследование проводилось на цельном кристалле МА, это означает, что при уменьшении размера частиц скорость деструкции увеличится.

Результаты ТГА аддукта (рис. 17), наоборот, демонстрируют повышение стойкости к температурам относительно ДЦПД (испаряется при 40–60 °С, не доходит до рабочей температуры измерительного оборудования) и МА, деструкция начинается со 150 °С. Заметные структурные изменения также начинают происходить при 140–150 °С, что удовлетворяет требованиям к полимерным композитам космического назначения.

Дифференцирование показателей ТГ (рис. 18) показывает более плавное изменение течения

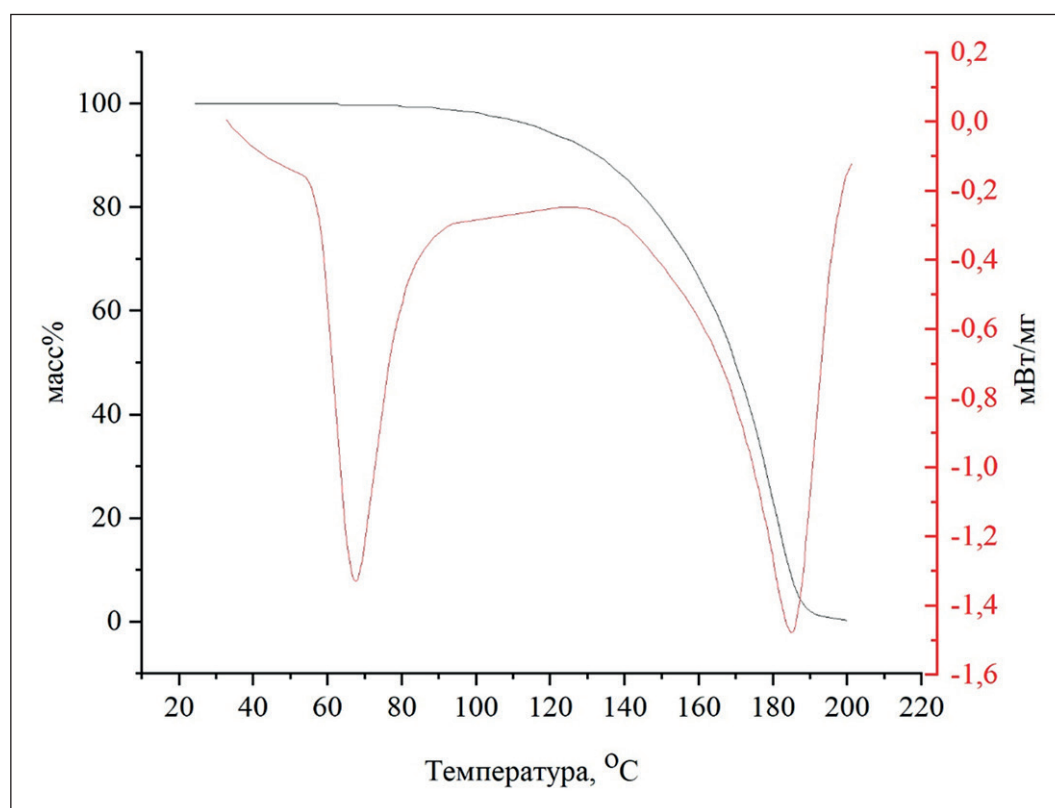


Рис. 16. Термогравиметрический анализ малеинового ангидрида

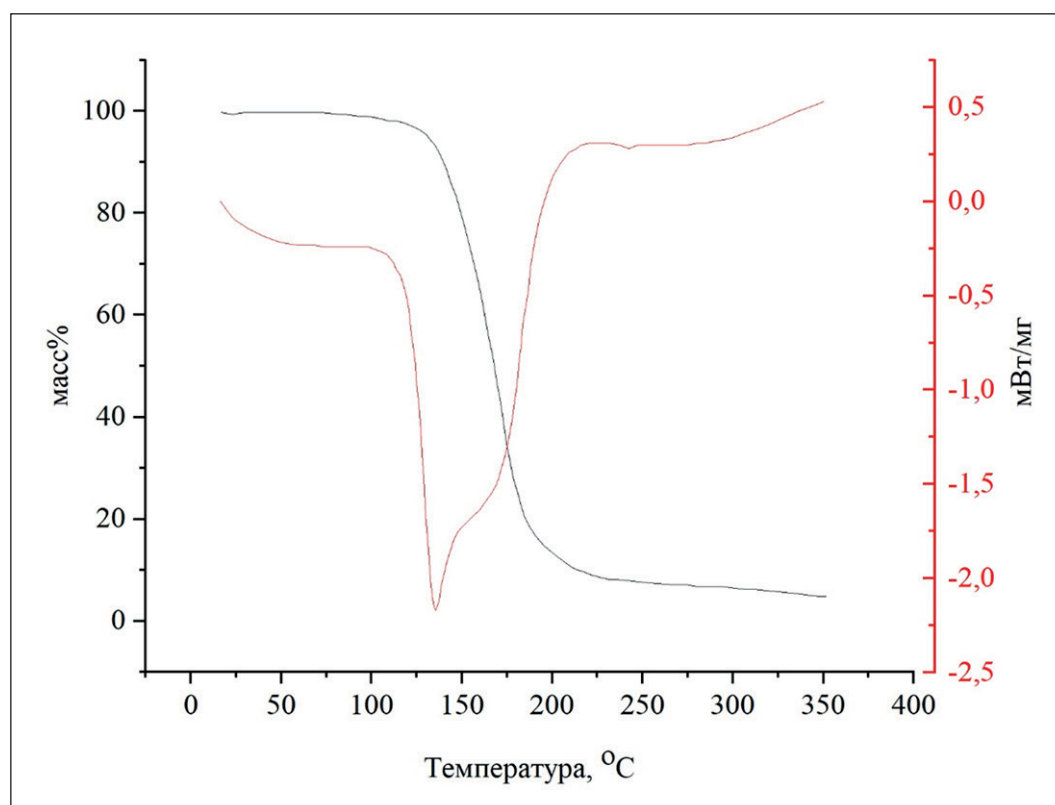


Рис. 17. Термогравиметрический анализ аддукта

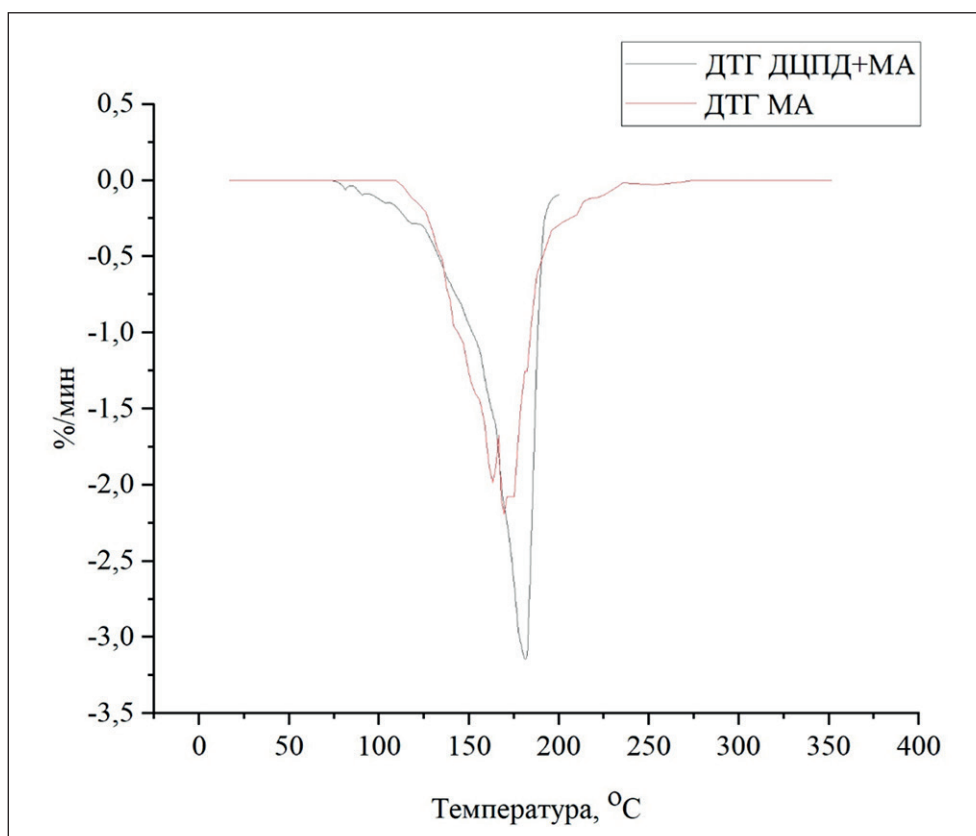


Рис. 18. Кривые ДТГ аддукта и МА

деструкции аддукта относительно малеинового ангидрида, что с инженерной точки зрения облегчает последующее предсказание механических параметров композита при расчете нагрузок на композиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование двухкомпонентных функциональных эпоксидных смол — наиболее перспективный вариант для получения самозалечивающихся материалов. Настраиваемый широкий температурный спектр соединений и разветвленная структура в совокупности с высокой реакционной активностью

предлагают более надежный с инженерной точки зрения конечный материал по сравнению с иными композиционными решениями.

В результате проделанной работы получен стойкий к термическому воздействию (до 150 °С) отвердитель для эпоксидных смол, что подтверждается результатами термогравиметрического анализа. Расчеты, проведенные по методу функциональной плотности, подтвердили наличие аддуктов реакции ДЦПД и МА. Аддукт, полученный при взаимодействии ДЦПД и МА, пригоден для использования в качестве отвердителя эпоксидных смол в полимерных самозалечивающихся композитах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanu N.J., Gupta E., Vates U.K., Singh G.K. Self-healing composites: A state-of-the-art review. *Composite Part A*. 2019; 121:474–486. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.012>. — EDN: VWZXCK
2. Priyadarsini M., Sahoo D.R., Biswal T. A new generation self-healing composite materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 47:1229–1233. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.456>. — EDN: YNPYCU
3. Das R., Melchior C., Karumbaiah K.M. Self-healing composites for aerospace applications. *Advanced composite materials for aerospace engineering*. 2016; 333–364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00011-0>.

4. Kontiza A., Kartsonakis I.A. Smart composite materials with self-healing properties: A review on design and applications. *Polymers*. 2024; 16(15):2115. <https://doi.org/10.3390/polym16152115>. – EDN: COXYEL
5. Hia I.L., Vahedi V., Pasbakhsh P. Self-healing polymer composites: prospects, challenges, and applications. *Polymer Reviews*. 2016; 56(2):225–261. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1106555>
6. Mobaraki M., Ghaffari M., Mozafari M. Basics of self-healing composite materials. *Self-healing composite materials*. 2020; 15–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00002-8>
7. Islam S., Bhat G. Progress and challenges in self-healing composite materials. *Materials advances*. 2021; 2(6):1896–1926. <https://doi.org/10.1039/D0MA00873G>. – EDN: QHNMAL
8. Wang Y., Pham D.T., Ji C. Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*. 2015; 2(1): 1075686. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>. – EDN: XUODAT
9. Adil M. M., Rabbi M. S., Tasnim T. Development of microcapsule-based self-healing composite: A critical review on influencing factors of microencapsulation, healing efficiency, thermal stability and application. *Alexandria Engineering Journal*. 2025; 122:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.02.092>. – EDN: CSNNAR
10. Ramezani M.J., Rahmani O., Ebrahimnezhad-Khaljiri H. Effect of graphene nanoplates in self-healing composite containing urea-formaldehyde microcapsules under tensile and interlaminar shear strength tests. *Results in Engineering*. 2025; 106357. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106357>. – EDN: KMQDRG
11. Paladugu S.R.M., Sreekanth P.S.R., Sahu S.K., Naresh K., Karthick S.A., Venkateshwaran N., Ramoni M., Mensah R.A., Das O., Shanmugam R. A comprehensive review of self-healing polymer, metal, and ceramic matrix composites and their modeling aspects for aerospace applications. *Materials*. 2022; 15(23):8521. <https://doi.org/10.3390/ma15238521>. – EDN: QFSGNS
12. Kumar E.K., Patel S.S., Kumar V., Panda S.K., Mahmoud S.R., Balubaid M. State of art review on applications and mechanism of self-healing materials and structure. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023; 30(2):1041–1055. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09827-3>. – EDN: XCARXF
13. Yao Jialan, Yang Chenpeng, Zhu Chengfei, Hou Baoqing. Preparation Process of Epoxy Resin Microcapsules for Self-healing Coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132:440–444. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.015>
14. Wenjing Jiang, Gang Zhou, Cunmin Wang, Yifang Xue, Chenxi Niu. Synthesis and self-healing properties of composite microcapsule based on sodium alginate/melamine-phenol-formaldehyde resin. *Construction and Building Materials*. 2021; 271:121541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121541>
15. Irzhak V.I., Uflyand I.E., Dzhardimalieva G.I. Self-healing of polymers and polymer composites. *Polymers*. 2022; 14(24):5404. <https://doi.org/10.3390/polym14245404>. – EDN: XOKPYG
16. Shebaz J.P.A., Meenakshisundaram O., Subramanian P.G. Review of self-healing strategies contributing to sustainable resilience in polymer composite systems. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2026; 1–26. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2025.2611052>
17. Xiuxiu Liu, Hairui Zhang, Jixiao Wang, Zhi Wang, Shichang Wang. Preparation of epoxy microcapsule based self-healing coatings and their behavior. *Surface and Coatings Technology*. 2012; 206(23):4976–4980. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.133>
18. Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 87:92–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>
19. Navarchian A.H., Najafipour N., Ahangaran F. Surface-modified poly(methyl methacrylate) microcapsules containing linseed oil for application in self-healing epoxy-based coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132:288–297. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.03.029>
20. Fei Yu, Hengyu Feng, Linghan Xiao, Yu Liu. Fabrication of graphene oxide microcapsules based on Pickering emulsions for self-healing water-borne epoxy resin coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 155:106221. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106221>
21. K. C. Nicolaou Prof. Dr., Scott A. Snyder, Tamsyn Montagnon Dr., Georgios Vassilikogiannakis Dr. The Diels–Alder Reaction in Total Synthesis. *Angewandte Chemie*. 2002; 41(10):1668–1698. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020517\)41:10<1668::aid-anie1668>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020517)41:10<1668::aid-anie1668>3.0.co;2-z)
22. Huertas D., Florscher M., Dragojlovic V. Solvent-free Diels–Alder reactions of in situ generated cyclopentadiene. *Green Chem*. 2009; 11:91–95. <https://doi.org/10.1039/b813485e>
23. Tianhui Liu, Yuzeng Zhao, Yining Deng, Honghua Ge, Preparation of fully epoxy resin microcapsules and their application in self-healing epoxy anti-corrosion coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2024; 188:108247. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108247>
24. Blaiszik B.J., Sottos N.R., White S.R. Nanocapsules for self-healing materials. *Composites Science and Technology*. 2008; 68(3–4):978–986. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.021>. – EDN: KJOSXF

25. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A. Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene. *Nanotechnology in Construction*. 2025; 17(2):189–200. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200>. – EDN: XIVHFT

26. Тарасевич Б.Н. *ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы*. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2012;54.

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

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Павленко Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, заведующий кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация, pavlenko.v.i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3464-1880>

Серебряков Сергей Викторович – ассистент кафедры теоретической и прикладной химии, младший научный сотрудник НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация, serebr43@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0284-6647>

Ручий Артём Юрьевич – инженер-исследователь НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Российская Федерация, artiem.ruchii.99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2617-5624>

Самойлова Юлия Михайловна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел, Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И.Д. Путилина, 308024, г. Белгород, ул. Горького 71, Российская Федерация, y.samoylova.bel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8750-805X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Черкашина Наталья Игоревна – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования; доработка текста статьи.

Павленко Вячеслав Иванович – разработка методологии исследования; анализ результатов исследования; выводы статьи.

Серебряков Сергей Викторович – проведение экспериментальной части исследования; графическое и табличное представление результатов; написание первоначального текста статьи.

Ручий Артём Юрьевич – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследований.

Самойлова Юлия Михайловна – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.02.2026; одобрена после рецензирования 28.03.2026; принята к публикации 03.04.2026.

Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste

Irina V. Stepina^{1,2} , Alexey D. Zhukov^{1,3} , Valeriya V. Strokov² , Sofya I. Bazhenova^{1*} 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation

³ Research Institute of Building Physics, 21 Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: bazhenovasi@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. Waste from wood processing and agricultural products can be used as components of building materials, as fuel in briquettes, etc. A rapidly developing area for the utilization of this waste, as well as waste from the pulp and paper industry, is its use as a resource for producing building materials. **The aim** of the research is to study the possibility of using waste from wood processing and paper production, including lignosulfonates, as binders for the creation of composite materials. **Methods and Materials.** The object of the study is a heat-insulating material based on wood processing waste and a modified lignin-containing binder, as well as methods for modifying this binder. The possibility of using sodium lignosulfonate activated with an aqueous solution of boron-nitrogen compounds was studied as a binder. The samples were produced by pressing softwood sawdust with modified lignin, followed by heat treatment of the molded green product. **Results.** The values of density and strength of the samples were determined depending on the composition and heat treatment regimes. It was found that the samples with modified lignosulfonate exhibit the best properties. Digital optimization of the manufacturing parameters and formulation factors was carried out for this material. It was established that the best properties are achieved with an average softwood sawdust size of 8.0 mm, a modifier content of 7.5%, and a heat treatment temperature of 103–104 °C. The flexural strength of the samples with the optimal composition is 3.4–3.5 MPa, the compressive strength at 10% deformation is 4.7 MPa, and the average density is 683 kg/m³. The discrepancy between the calculated and experimental values for flexural strength does not exceed 7.0%. **Discussion.** The experiments, including those conducted using digital methods, confirmed the feasibility of using boron-nitrogen compounds to modify the properties of lignin, which can be considered as a natural binder. **Conclusion.** The obtained products fully comply with the requirements for composite heat-insulating materials, and the use of boron-nitrogen compounds as a modifier not only affects the mechanical properties of the products but also increases the resistance of the resulting material to decay processes and other biological impacts.

KEYWORDS: wood processing waste, cellulose-containing materials, lignin, sodium lignosulfonate, boron-nitrogen compounds, heat treatment

ACKNOWLEDGMENTS: The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2026-0005 using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION:

Stepina I.V., Zhukov A.D., Strokov V.V., Bazhenova S.I. Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов

Ирина Васильевна Степина^{1,2} , Алексей Дмитриевич Жуков^{1,3} , Валерия Валерьевна Строкова² , Софья Ильдаровна Баженова^{1*} 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

² Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский институт строительной физики, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Отходы переработки древесины и сельскохозяйственной продукции могут использоваться как компоненты строительных материалов, как топливо в брикетах и пр. Активно развивающимся направлением использования этих отходов, равно как и отходов целлюлозно-бумажной промышленности, является их утилизация в качестве ресурсного источника для получения строительных материалов. **Целью** исследований является изучение возможности использования отходов деревообработки и производства бумаги, в том числе лигносульфонатов, в качестве связующих для создания композиционных материалов. **Методы и материалы.** Объектом исследования являются теплоизоляционные материалы на основе отходов деревообработки и модифицированного лигнин-содержащего связующего, а также способы модификации этого связующего. В качестве связующего изучалась возможность применения лигносульфоната натрия, активированного водным раствором боразотных соединений. Образцы изготавливались прессованием опилок хвойных пород с модифицированным лигнином и последующей тепловой обработкой формованного сырца. **Результаты.** Определены значения плотности и прочности образцов в зависимости от состава и режимов тепловой обработки. Установлено, что наилучшими показателями обладают образцы с модифицированным лигносульфонатом. Цифровая оптимизация параметров изготовления и рецептурных факторов проводилась именно для этого материала. Установлено, что наилучшие показатели получены при среднем размере опилок хвойных пород 8,0 мм, расход модификатора 7,5% и температуре тепловой обработки 103–104 °С. Прочность образцов оптимального состава при изгибе составляет 3,4–3,5 МПа. Прочность при сжатии при 10% деформации 4,7 МПа, средняя плотность – 683 кг/м³. Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями величин по прочности при изгибе не превышает 7,0%. **Обсуждение.** Эксперименты, в том числе и проведенные на основе цифровых методик, подтвердили целесообразность применения боразотных соединений для модификации свойств лигнина, который может рассматриваться как природное вяжущее вещество. **Заключение.** Полученные изделия вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным теплоизоляционным материалам, и использование в качестве модификатора боразотных соединений не только влияет на механические свойства изделий, но и позволяет повысить стойкость полученного материала по отношению к процессам гниения и другим биологическим воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отходы деревообработки, целлюлозосодержащие материалы, лигнин, лигносульфонат натрия, боразотные соединения, тепловая обработка

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2026-0005 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Степина И.В., Жуков А.Д., Строкова В.В., Баженова С.И. Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

INTRODUCTION

Current realities of construction predetermine interest in the development of innovative materials with high performance characteristics and minimal negative impact on the

environment, as well as composite materials belonging to the groups of nature-like and energy-efficient materials [1–3]. In this regard, cellulose- and lignin-containing by-products from other industries are of interest. The sources of these materials are wood processing waste, pulp and paper industry waste, and agricultural waste [4–6].

For a long time, the main method of utilizing wood processing waste, pulp and paper industry waste, as well as agricultural waste, was their direct disposal as a combustible material and, at best, as fuel, but mostly they were simply burned to ash [7–9]. Economically justified is the mechanical processing of waste, followed by the use of the semi-finished product as a component for various materials, including building materials. Positive experience has been accumulated in solving materials science aspects in the production of fiberboard, particleboard, hardboard, and oriented strand board. The most innovative is deep processing of waste aimed at obtaining a cellulose component, followed by its use in various industries: from pharmacology to paper production [10–12]. In construction, such technologies have been tested in the development of fiber-cement products.

Many of these wastes and by-products contain lignocellulose, but mainly they contain cellulose, lignin, hemicellulose, and extractive substances such as phenolic compounds and a mineral component (ash residue). Technically useful substances are contained in almost all raw material sources of this group and differ in properties and final product yield [13–15]. Composite materials based on wood processing waste and lignin-based binders are a promising innovative direction. Using these components, a wide range of building materials can be obtained: finishing and heat-insulating materials. Controlling the porous structure also makes it possible to obtain acoustic materials, in particular sound-absorbing ones.

Lignin is a component of all materials in this group and can be considered an environmentally friendly binder: non-toxic and biodegradable. The use of lignin minimizes negative impact on the environment and human health [16]. As a result of wood processing and pulp cooking, the production of lignin as a by-product is about 70 million tons [17], which makes its utilization economically feasible compared to alternative binders [18].

There are three main types of lignin as a by-product. First, it is hydrolysis lignin. Hydrolysis lignin is used in medicine and agriculture. The main possibilities for its use include use as sorbents, blowing agents, fertilizers, as an additive for soil structuring, and as herbicides. Second, there is sulfate lignin (kraft lignin), which is a large-tonnage waste from the pulp and paper industry. This material is used as fuel [19] or, for the most part, is disposed of in huge quantities in landfills [16, 20]. Previous studies have shown the feasibility of modifying lignin-containing materials using boron-nitrogen compounds [18–20].

Modification with boron-nitrogen compounds is aimed at changing the composition and properties of the cell walls of plant raw materials, in which the separation of lignin and the carbohydrate complex occurs. The improvement of lignin properties occurs during the interaction of the modifier with the hydroxyl groups of lignin, which leads to the formation of stable ether bonds. This

factor also contributes to an increase in the ability of lignin to bind with other components of the material. The modified lignin obtained in this way can potentially serve as a binder in the creation of composite materials [21–23].

The aim of the research is to study the possibility of using waste from wood processing and paper production, including liginosulfonates, as binders for the creation of composite materials.

As objects of study, samples of composite materials made by pressing a mixture of pine sawdust with sodium liginosulfonate were studied. The activator was water (LSw) and a modifier, which was taken as boron-nitrogen compounds (LSm). The properties of samples obtained by pressing pine sawdust with native lignin modified with boron-nitrogen compounds (NLm) were also studied.

MATERIALS AND METHODS

Native lignin modified with boron-nitrogen compounds (NLm) was used as a binder, and wood sawdust was used as a filler (and as a component forming the macrostructure of the product). The samples were manufactured as follows. First, pine sawdust of 5–10 mm fraction was boiled in a solution of a boron-nitrogen compound (“Xylostat”) in a water bath [16]. The boiling temperature was 100 °C, and the duration was 1 hour. Second, the boiled mixture was filtered. At the third stage, the green products were molded and the modified sawdust was pressed. At this stage, modified lignin was released from the sawdust. This modified lignin served as a natural binder. It should be noted that the extraction of lignin from softwood raw materials is used in the technology of hard fiberboard, the properties of which are formed during thermo-compression treatment of fiber mats with the release and subsequent curing of lignin.

At the preliminary testing stage, series of samples were manufactured in the form of 50×50×50 mm cubes. The varied factors were drying parameters: at 25 °C under standard conditions, and in a drying oven: heat treatment at 105, 125, and 150 °C until constant mass. After molding the green samples of LSw and LSm in the form of 50×50×50 mm cubes, they were pressed at a pressure of 80 kPa. The response factors were compressive strength at 10% relative deformation, flexural strength, average density, and thermal conductivity. The properties were tested after 30 days.

Samples based on sodium liginosulfonate binder (LSw) were manufactured by mixing it with softwood sawdust of 5–10 mm fraction and water. The mass ratio of components was sawdust/liginosulfonate (LS)/water = 1:1:0.5. Samples based on a binder containing boron-nitrogen compounds (BNC) and LSm as a modifier were manufactured by mixing softwood sawdust of 5–10 mm fraction with sodium liginosulfonate modified with a BNC solution. The mass ratio of components was sawdust/

lignosulfonate/modifier = 1:1:1. The studies at the second testing level were carried out using digital methods.

Part of the research was conducted using the equipment of the Shared Knowledge Center (SKC) of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

RESULTS

Preliminary tests showed an increase in strength with increasing drying temperature for samples with modified lignin (NLm) as a binder. With comparable sample density, the compressive strength at 10% relative deformation was 1.36 MPa for samples dried at 150 °C and 0.44 MPa for samples dried under normal conditions at 25 °C. The compressive strength at 10% deformation for samples with LSw was significantly higher than for those with NLm: 2.62, 2.94, and 2.57 MPa, respectively, when dried at 25 °C, 105 °C, and 125 °C. Samples with a binder modified with boron-nitrogen compounds exhibited better biocidal properties, and their strength (at 10% deformation) was 1.45–1.52 times higher, amounting to 4.06, 4.51, and 4.33 MPa, respectively, when dried at 25 °C, 105 °C, and 125 °C.

Preliminary analysis of the experimental data made it possible to establish the upper limit of the heat treatment temperature, which should not exceed 105 °C in the material (and 125 °C inside the drying chamber). At higher temperatures, boiling of water in the material (as a result of the phase transition) may occur. The results of the compressive strength tests are shown in Fig. 1.

Based on the experience gained at the preliminary stage of the experiment, the plan for further research was focused on the use of materials with lignosulfonate modified with boron-nitrogen compounds (LSm) as a binder. The research was carried out using mathematical design of experiments and statistical processing of the results [24, 25].

The variable factors were the average size of softwood sawdust (X_1), the consumption of modifier relative to the mass of dry sawdust (X_2), and the temperature in the chamber during heat treatment (X_3). The size distribution of softwood sawdust is unimodal and close to normal. Therefore, the average size is taken as the expected value of the size distribution (average size). During the experiment, it was taken into account that at the initial stages of heat treatment the temperature of the material lags behind the temperature of the chamber, but with further heat exposure the temperature difference becomes minimal.

Processing of the experimental results and testing of statistical hypotheses was carried out using the Statistika software. The processing was performed using the “Analytical Optimization” method developed at Moscow State University of Civil Engineering (NRU) and tested in solving formulation problems and selecting technological parameters for many building materials [26, 27]. The experimental conditions are given in Table 1.

The response functions were compressive strength at 10% deformation (Y_1), flexural strength (Y_2), and average density (Y_3). Flexural strength was taken as the optimization parameter.

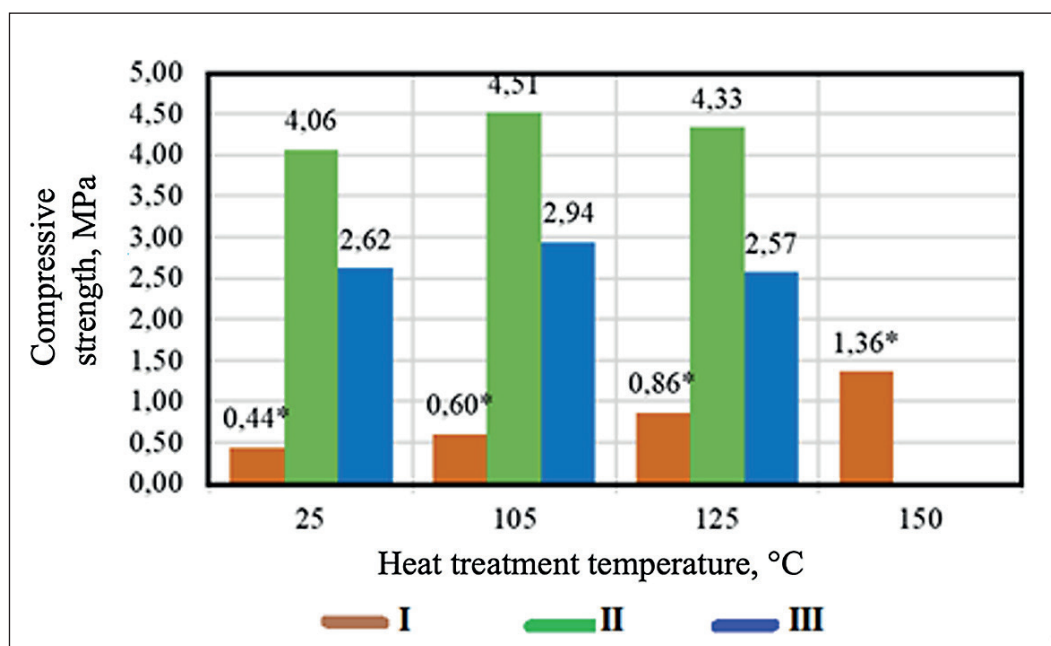


Fig. 1. Results of strength tests (compressive strength at 10% deformation): I – samples with NLm, average density 560 kg/m³; II – samples with LSm, average density 830 kg/m³; III – samples with LSw, average density 690 kg/m³

Table 1. Experimental conditions

Factor	Symbol X_i	Mean value of factor, \bar{X}_i	Variation interval, ΔX_i	Factor values at levels	
				-1	+1
Softwood sawdust size l , mm	X_1	8	2	6	10
Modifier consumption C_c , %	X_2	6	2	4	8
Heat treatment temperature, °C	X_3	85	25	60	110

The confidence interval for the regression coefficients (Δb) was determined using the Student's t-test (chosen for three degrees of freedom) and the variance of parallel experiments. The significance of the regression coefficients was assessed by comparing their absolute values with the confidence interval. Coefficients smaller than the confidence interval were considered insignificant and set to zero. The adequacy of the obtained polynomials was tested using Fisher's criterion (by comparing calculated and tabulated values). The following regression equations were obtained:

For compressive strength at 10% deformation ($\Delta b_1 = 0.22$ MPa):

$$Y_1 = 4.1 + 0.4X_1 + 0.6X_2 + 0.3X_3 + 0.2X_1X_2 - 0.2X_3^2. \quad (1)$$

For flexural strength ($\Delta b_2 = 0.16$ MPa):

$$Y_2 = 2.9 + 0.3X_1 + 0.4X_2 + 0.2X_3 + 0.2X_1X_2. \quad (2)$$

For average density ($\Delta b_3 = 4$ kg/m³):

$$Y_3 = 676 + 12X_1 + 8X_2 + 6X_1X_2. \quad (3)$$

Analysis of the coefficients of the regression equations (1, 2, 3) allows one to evaluate the influence of each factor on the results within the intervals established for the experiment (see Table 1). Increasing the size of softwood sawdust (X_1) leads to an increase in both compressive and flexural strength and results in a slight increase in average density. The increase in strength is associated with a geometric factor that provides an increase in the number of contacts between wood particles, which are consolidated by the binder, while the increase in average density is related to the moisture capacity of the sawdust. The modifier consumption (X_2) has the greatest effect on the strength characteristics, which is due to the improvement in the strength properties of both the modified binder and the wood particles that undergo natural impregnation. An increase in the heat treatment temperature, which in the laboratory experiment was carried out in a drying oven, has practically no effect on the average density of the samples (the coefficient is smaller than the confidence interval, and therefore smaller than the experimental error), but it has a significant effect on the strength characteristics.

Analysis of the coefficients for X_3 in equation (1) shows that the dependence of compressive strength on temperature is distinctly non-linear: the increase in strength with increasing heat treatment temperature first increases (coefficient for X_3 equal to 0.3), and when the temperature exceeds a certain value, it begins to decrease (coefficient for X_3^2 equal to -0.2). The increase in strength is due to reactions between the modified lignin and the modifier, as well as in the surface layer of the wood particles, while the tendency toward a decrease in strength is associated with the phase transition of water into steam and loosening of the structure.

The value of the allowable threshold of heat treatment temperature can be determined using the method of analytical optimization. In this case, equations (1–3) are considered as algebraic polynomials: functions of two or three variables, to which the methods of mathematical analysis for continuous functions can be applied. The implementation procedure of the method is as follows:

1. Determine the extremum of function (1) with respect to X_3 :

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0.3 - 0.4X_3 = 0 \rightarrow X_3 = 0.75.$$

2. Solve equations (1–3) for $X_3 = 0.75$:
For compressive strength:

$$Y_1 = 4.2 + 0.4X_1 + 0.6X_2 + 0.2X_1X_2. \quad (4)$$

For flexural strength:

$$Y_2 = 3.0 + 0.3X_1 + 0.4X_2 + 0.2X_1X_2. \quad (5)$$

For average density ($\Delta b_3 = 4$ kg/m³), equation (3) remains unchanged.

3. Determine the value of the threshold heat treatment temperature in natural units (using the data from Table 1):

$$t_{th} = 85 + 25 \times 0.75 = 103\text{--}104 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Perform a graphical interpretation of equations (3, 4, 5); the results are presented in the form of a nomogram (Fig. 2). The nomogram contains three sectors: sector I allows estimation of the flexural strength R_s , MPa; sector II – compressive strength at 10% deformation R_c , MPa; sector III – average density of samples ρ , kg/m³.

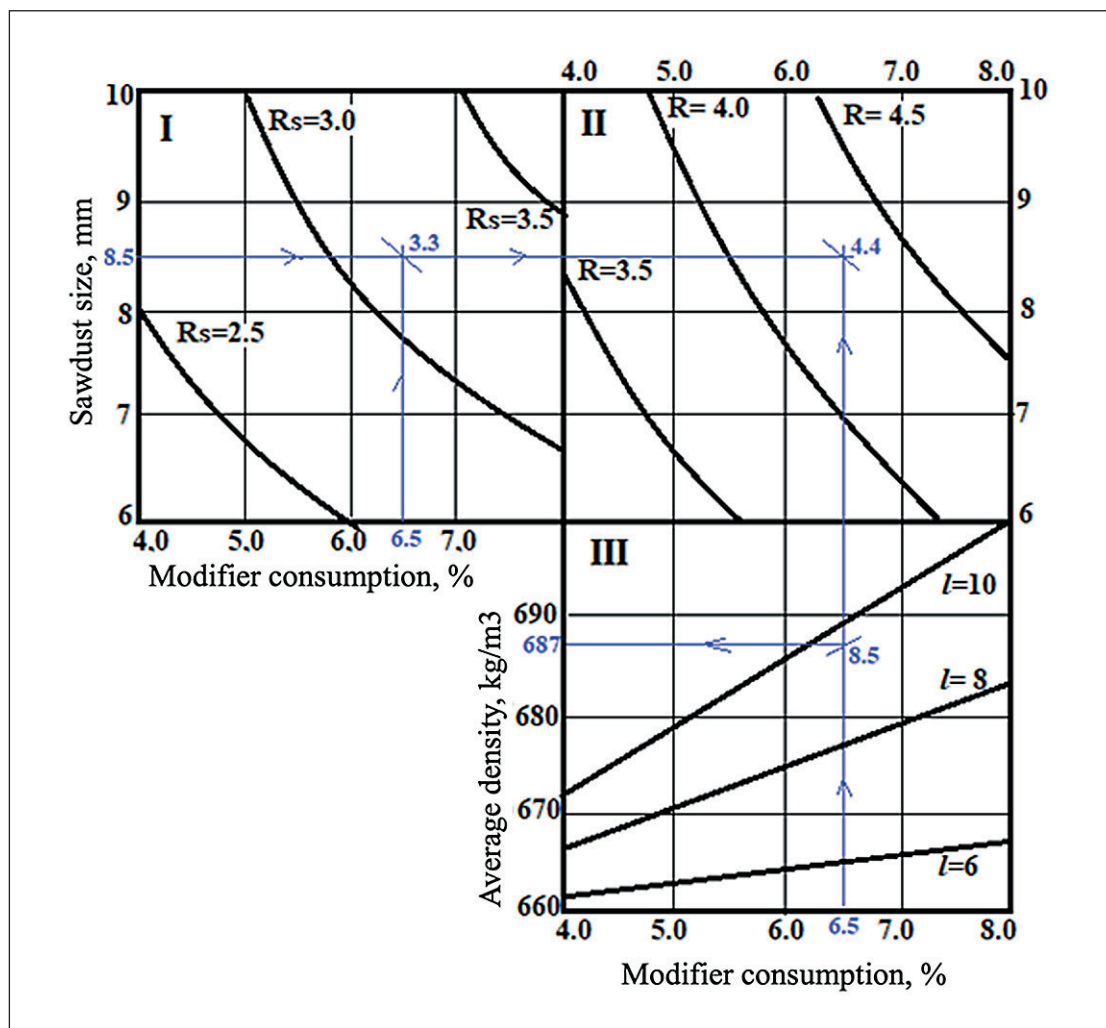


Fig. 2. Nomogram for evaluating material properties at the optimized heat treatment temperature of 103–104 °C; sectors: I – flexural strength R_s , MPa; II – compressive strength at 10% deformation R , MPa; III – average density ρ , kg/m^3

Solving the predictive problem graphically is as follows. The values of the variable factors (in natural units) are marked on the coordinate axes. In the example (Fig. 2, blue lines), the average softwood sawdust size l^* is set to 8.5 mm and the modifier consumption C_c to 6.5%. These points are marked on the coordinate axes. From the point $l^* = 8.5$ mm, a straight line parallel to the abscissa axis is drawn through sectors I and II. In sectors I and II, straight lines parallel to the ordinate axis are drawn from the points $C_c = 6.5\%$. In sector I, the flexural strength is determined at the intersection of the lines ($R_s = 3.3$ MPa), and in sector II, the compressive strength at 10% deformation is determined similarly ($R = 4.4$ MPa). Next, in sector III, the average density is obtained. The intersection point of the “modifier consumption” and “sawdust size” lines is found, and from this point a line is drawn parallel to the abscissa axis, giving the average density (ρ) equal to 687 kg/m^3 .

The predictive problem can also be solved using a computer program based on optimized algebraic functions of two variables (Formulas 4–6) or the basic polynomials (1–3).

The program algorithm includes the following blocks, implemented sequentially. Block 1 provides for the input of factors in natural units and their coding, i.e., reduction to the interval $[-1; +1]$. Block 2 is the calculation block and involves the use of either the basic polynomials or the optimized functions. Block 3 ensures the output of the calculation results to the computer display and to the printer.

When using digital modeling methods, it is very important to confirm the adequacy of the obtained mathematical (statistical) models to the real processes. The verification is carried out at two levels. First, during statistical processing, the adequacy of the polynomials is checked using Fisher’s criterion. Second, after obtain-

Table 2. Verification of second-level adequacy

No.	Variable parameters		Flexural strength (MPa)		
	Softwood sawdust size (l), mm	Modifier consumption Cc, %	Calculated	Actual	Δ , %
1	9.5	7.5	3.9	3.7	5.3
2	9.5	4.5	2.7	2.9	6.8
3	8.0	6.0	3.0	3.1	3.3
4	8.0	7.5	3.4	3.5	2.9
5	8.0	4.5	2.6	2.7	3.6
6	9.5	6.0	3.3	3.2	3.0
7	6.5	6.0	2.7	2.6	3.7
8	6.5	4.5	2.5	2.6	3.8
9	6.5	7.5	2.9	2.7	6.9

ing the calculated results, a repeated active experiment is carried out and the discrepancy between the calculated values and the experimental results is evaluated (Table 2).

After obtaining the calculated results analytically (using a computer program or graphical method), an additional verification is carried out in repeated series of active experiments. Flexural strength (MPa) is taken as the evaluation criterion. The results of the comparative analysis at the optimized heat treatment temperature of 103–104 °C are presented in Table 2.

The discrepancy between the calculated and experimental values for flexural strength (Δ) does not exceed 7.0%, which is fully consistent with the accuracy level accepted in building materials science (up to 10%). The best properties correspond to the values of the variable factors in experiment No. 4: an average softwood sawdust size of 8.0 mm and a modifier consumption of 7.5%. These conditions correspond to the calculated values of compressive strength at 10% deformation of 4.7 MPa and an average density of 683 kg/m³, obtained using analytical dependences (1) and (3).

In addition to the possibility of obtaining materials with the highest possible strength characteristics at an average density of no more than 700 kg/m³, the use of lignosulfonates is preferable for economic reasons. The use of modified lignosulfonates implies lower production labor intensity, as well as a waste-free technology. After the separation of modified lignin in a water bath, the sawdust is strained, and most of the solution is reused. Moreover, the resulting composite material based on sawdust and modified lignin can be considered to be entirely made from secondary raw materials: wood processing waste and by-products of the pulp and paper industry.

CONCLUSIONS

The obtained products fully meet the requirements for composite heat-insulating materials, and the use of boron-nitrogen compounds as a modifier not only affects the mechanical properties of the products but also increases the resistance of the resulting material to decay processes and other biological impacts.

The use of lignosulfonates is also preferable from an economic standpoint due to lower production labor intensity and the waste-free nature of the technology. The resulting composite material based on sawdust and modified lignin can be considered to be completely manufactured from wood and pulp and paper industry waste.

The use of sodium lignosulfonate as a modified binder in composite building materials based on wood waste is a promising direction. The availability and low cost make lignosulfonates an attractive option for replacing traditional binders, such as phenol-formaldehyde resins and other phenolic compounds.

The use of boron-nitrogen compounds as a modifier is advisable, since their introduction both improves the strength characteristics of the product and reduces the risk of decay of softwood sawdust, thereby increasing the durability of the products.

Fully realizing the potential of using lignosulfonates as a binder and boron-nitrogen compounds as a modifier requires further research, development, and testing aimed at optimizing their properties. The use of digital methods makes it possible to obtain reliable results with a minimum number of active experiments, and also contributes to the optimization of formulations and production parameters of composite materials.

REFERENCES

1. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Nature-like materials and structures in mechanical engineering. *All materials. Encyclopedic reference*. 2020;6:2-7. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-0-6-2-7> – EDN: GIHEPB.
2. Zhukov A.D., Bobrova E.Y., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Energy efficiency of construction systems: “Scientific-publishing center Infra-M” LLC, 2022;329. (Scientific thought). ISBN 978-5-16-017479-2. <https://doi.org/10.12737/1856852> – EDN: OUWLAU.
3. Ter-Zakaryan K.A., Sabu T., Zhukov A.D., Blessy B., Bessonov I.V., Perozhogin Y.D. Seamless insulation systems for arctic conditions. *Construction materials*. 2025;5:5-12. <https://doi.org/10.316559/0585-430X-2025-5-5-12> – EDN: YCCXDO.
4. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021;13(21):3698; <https://doi.org/10.3390/polym13213698> – EDN: HHPQWN.
5. Lesovik V.S. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017;1(100):9-16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16> – EDN: XRJBSV.
6. Sagar B.M., Islam Md.M., Habib Md.L., Ahmed S., Sahadat Hossain Md. Utilization of natural and waste sources for synthesis of cellulose, chitin, and chitosan for a suitable environment. *RSC Advances*. 2025;32(15):26276-26301. <https://doi.org/10.1039/d5ra02896e> – EDN: FSMGCW.
7. Mondal P., Mondal M., Chakraborty J., Sing N., Ghosh B., Roy S., Mahali K. Advances in upcycling waste cellulose into functional materials: strategies, challenges, and emerging applications – A comprehensive review. *Next Research*. 2025;4(2):100768. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100768> – EDN: VSNXHO.
8. Karmanov A.P., Kocheva L.S., Belyy V.A. Topological structure and antioxidant properties of macromolecules of lignin of hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Polymer*. 2020;202:122756. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122756> – EDN: RUFFOH.
9. Hasheminya S.M., Dehghannya Ja. Chemical composition, antioxidant, antibacterial, and antifungal properties of essential oil from wild *Heracleum rawianum*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021;31:101913. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101913> – EDN: LBHDTB.
10. Gong Ch., Ju Zh., Lin Q., Lv X., Smith R.L., Xu L., Cao Ya., Shuai Li., Fang Zh. One-step valorization of cellulose acetate plastic waste into 5-hydroxymethylfurfural. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2026;381:125880. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.125880> – EDN: VFUVGZ.
11. Palaniappan M., Palanisamy S., Tadepalli S. [et al.] Extraction and characterization of cellulose from *Anacardium occidentale* shells: A sustainable approach to industrial waste management. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;320:146120. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146120> – EDN: ICIAES.
12. Kassab Z., Abdellaoui Y., Salim M.H., El Achaby M. Cellulosic materials from pea (*Pisum Sativum*) and broad beans (*Vicia Faba*) pods agro-industrial residues. *Materials Letters*. 2020;280:128539. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128539> – EDN: FVVERX.
13. Mohamad Haafiz M.K., Eichhorn S.J., Hassan Azman, Jawaid M. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. *Carbohydrate Polymers*. 2013;2:628-634. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.035>
14. Hosseini S. S., Moradi A. M., Javid A. H., Mahvi A. H. From waste to water savior: Fe–Mn-boosted waste-derived cellulose for sustainable tetracycline treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;327:147286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147286> – EDN: HWOKBB.
15. Saha P., Ghosh S.K., Singh P. A holistic review on synthesis, properties, and multifunctional applications of cellulose aerogels from cellulose waste streams. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;321:146334. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146334> – EDN: LVBJUZ.
16. Kondrashov M. V., Stepina I. V. Theoretical foundations of using lignin as a binder for composite building materials. Actual problems of the construction industry and education – 2023: *Collection of reports of the IV National scientific conference*, Moscow, December 15, 2023. – Moscow: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). 2024:185-189. – EDN: NCUAAD.
17. Tuntsev D.V., Khairullina M.R., Romancheva I.S., Saveliev A.S. Use of lignin in the production of modern materials. Problems of reclamation of household, industrial and agricultural waste: IV International Scientific Environmental Conference (with the participation of ecologists from Azerbaijan, Armenia, Belarus, Germany, Georgia,

Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Lebanon, Moldova, Transnistria, Russia, Slovakia, Uzbekistan and Ukraine), Krasnodar, March 24–25, 2015. — Krasnodar: Kuban State Agrarian University. 2015:285–287. — EDN: UDPVTB.

18. Usova K.A., Zakharov P.S., Shkuro A.E. Promising areas of lignin application in the production of polymer and composite materials. *Young scientist*. 2023;8(455):11–16. — EDN: HMZKHS.

19. Simikova A. A., Chelysheva I. N., Plotnikov N. P. Application of lignin in the production of wood-polymer composites. *Bulletin of KrasSAU*. 2013;1(76):162–169. — EDN: PYXIHR.

20. Tsvetkov M.V., Salgansky E.A. Lignin: areas of use and methods of utilization (review). *Journal of Applied Chemistry*. 2018;91(7):988–997. <https://doi.org/10.1134/S0044461818070095> — EDN: XZIFIT.

21. Stepina I. V., Sodomon M., Kononov G. N., Petukhov V. A. Component composition of modified plant raw materials. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022;9(93):223–231. — EDN: DNXAFP.

22. Stepina I., Sodomon M., Semenov V. [et al.] Modifying Heracleum sosnowskyi Stems with Monoethanolamine(N→B)-trihydroxyborate for Manufacturing Biopositive Building Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;170:45–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_5

23. Patent for utility model No. 217420 U1 Russian Federation, IPC B27K 3/52. Biostable heat-insulating composite based on plant raw materials Geraizol: No. 2022121630: declared 09.08.2022: published 31.03.2023 / I.V. Stepina, M. Sodomon.

24. Zhukov A.D., Artemenko S.O., Zhuk P.M., Bobrova E.Yu., Medvedev A.A. Low-energy binder for stone wool-based products. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(4):377–388. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-377-388>. — EDN: BORGVT.

25. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bessonov I.V. [et al.] Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers*. 2022;14(21):4688. <https://doi.org/10.3390/polym14214688> — EDN: JPQEWQ.

26. Kozlov S., Efimov B., Zinovieva E. [et al.] Optimization of foamed plastic technology. *E3S Web of Conferences*: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, 18–21 апреля 2019 года. Vol. 97. — Tashkent: EDP Sciences. 2019:06010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706010> — EDN: YSIYLI.

27. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.B. [et al.] Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10–12 декабря 2018 года. Vol. 110. — St. Petersburg: EDP Sciences. 2019:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032> — EDN: HGSKBP.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that no generative artificial intelligence technologies or artificial intelligence-based technologies were used in the preparation of this article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina V. Stepina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Senior Researcher, Innovative Scientific, Educational and Experimental-Industrial Center for Nanostructured Composite Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation; sudeykina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

Alexey D. Zhukov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Leading Researcher, Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Engineering, 21 Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; lj211@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

Valeriya V. Stroková – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Materials Science and Materials Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation; vvstrokova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

Sofya I. Bazhenova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; bazhenovasi@mgsu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6111-201X>

CONTRIBUTIONS OF THE AUTHORS

I.V. Stepina – scientific supervision, development of the research concept, methodology development, final conclusions.

A.D. Zhukov – development of the research concept, methodology development and its adaptation to the research objectives, writing the original text, final conclusions.

V.V. Strokova – scientific consultation, text revision, final conclusions.

S.I. Bazhenova – methodology development, text revision.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 30.03.2026; accepted for publication 02.04.2026.

Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов

Ирина Васильевна Степина^{1,2} , Алексей Дмитриевич Жуков^{1,3} , Валерия Валерьевна Строкова² ,
Софья Ильдаровна Баженова^{1*} 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

² Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский институт строительной физики, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Отходы переработки древесины и сельскохозяйственной продукции могут использоваться как компоненты строительных материалов, как топливо в брикетах и пр. Активно развивающимся направлением использования этих отходов, равно как и отходов целлюлозно-бумажной промышленности, является их утилизация в качестве ресурсного источника для получения строительных материалов. **Целью** исследований является изучение возможности использования отходов деревообработки и производства бумаги, в том числе лигносульфонатов, в качестве связующих для создания композиционных материалов. **Методы и материалы.** Объектом исследования являются теплоизоляционные материалы на основе отходов деревообработки и модифицированного лигнин-содержащего связующего, а также способы модификации этого связующего. В качестве связующего изучалась возможность применения лигносульфоната натрия, активированного водным раствором боразотных соединений. Образцы изготавливались прессованием опилок хвойных пород с модифицированным лигнином и последующей тепловой обработкой формованного сырья. **Результаты.** Определены значения плотности и прочности образцов в зависимости от состава и режимов тепловой обработки. Установлено, что наилучшими показателями обладают образцы с модифицированным лигносульфонатом. Цифровая оптимизация параметров изготовления и рецептурных факторов проводилась именно для этого материала. Установлено, что наилучшие показатели получены при среднем размере опилок хвойных пород 8,0 мм, расход модификатора 7,5% и температуре тепловой обработки 103–104 °С. Прочность образцов оптимального состава при изгибе составляет 3,4–3,5 МПа. Прочность при сжатии при 10% деформации 4,7 МПа, средняя плотность – 683 кг/м³. Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями величин по прочности при изгибе не превышает 7,0%. **Обсуждение.** Эксперименты, в том числе и проведенные на основе цифровых методик, подтвердили целесообразность применения боразотных соединений для модификации свойств лигнина, который может рассматриваться как природное вяжущее вещество. **Заключение.** Полученные изделия вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным теплоизоляционным материалам, и использование в качестве модификатора боразотных соединений не только влияет на механические свойства изделий, но и позволяет повысить стойкость полученного материала по отношению к процессам гниения и другим биологическим воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отходы деревообработки, целлюлозосодержащие материалы, лигнин, лигносульфонат натрия, боразотные соединения, тепловая обработка

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2026-0005 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Степина И.В., Жуков А.Д., Строкова В.В., Баженова С.И. Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste

Irina V. Stepina^{1,2} , Alexey D. Zhukov^{1,3} , Valeriya V. Strokovaya² , Sofya I. Bazhenova^{1*} 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation

³ Research Institute of Building Physics, 21 Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: bazhenovasi@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. Waste from wood processing and agricultural products can be used as components of building materials, as fuel in briquettes, etc. A rapidly developing area for the utilization of this waste, as well as waste from the pulp and paper industry, is its use as a resource for producing building materials. **The aim** of the research is to study the possibility of using waste from wood processing and paper production, including lignosulfonates, as binders for the creation of composite materials. **Methods and Materials.** The object of the study is a heat-insulating material based on wood processing waste and a modified lignin-containing binder, as well as methods for modifying this binder. The possibility of using sodium lignosulfonate activated with an aqueous solution of boron-nitrogen compounds was studied as a binder. The samples were produced by pressing softwood sawdust with modified lignin, followed by heat treatment of the molded green product. **Results.** The values of density and strength of the samples were determined depending on the composition and heat treatment regimes. It was found that the samples with modified lignosulfonate exhibit the best properties. Digital optimization of the manufacturing parameters and formulation factors was carried out for this material. It was established that the best properties are achieved with an average softwood sawdust size of 8.0 mm, a modifier content of 7.5%, and a heat treatment temperature of 103–104 °C. The flexural strength of the samples with the optimal composition is 3.4–3.5 MPa, the compressive strength at 10% deformation is 4.7 MPa, and the average density is 683 kg/m³. The discrepancy between the calculated and experimental values for flexural strength does not exceed 7.0%. **Discussion.** The experiments, including those conducted using digital methods, confirmed the feasibility of using boron-nitrogen compounds to modify the properties of lignin, which can be considered as a natural binder. **Conclusion.** The obtained products fully comply with the requirements for composite heat-insulating materials, and the use of boron-nitrogen compounds as a modifier not only affects the mechanical properties of the products but also increases the resistance of the resulting material to decay processes and other biological impacts.

KEYWORDS: wood processing waste, cellulose-containing materials, lignin, sodium lignosulfonate, boron-nitrogen compounds, heat treatment

ACKNOWLEDGMENTS: The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2026-0005 using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION:

Stepina I.V., Zhukov A.D., Strokovaya V.V., Bazhenova S.I. Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

ВВЕДЕНИЕ

Современные реалии строительства предопределяют интерес к разработке инновационных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и минимальным негативным воздействием на окружающую среду, а также к композиционным материалам, относящимся к группам природоподобных и энегоэффективных [1–3]. В этом отношении представляют интерес целлюлозо- и лигнинсодержащие побочные отходы других производств. Источником этих материалов являются отходы деревообработки, целлюлозно-бумажной

промышленности, сельскохозяйственные отходы [4–6].

Основным методом использования отходов деревообработки, целлюлозно-бумажной промышленности, равно как и сельскохозяйственных отходов, долгое время являлась их прямая утилизация как горючего материала и, в лучшем случае, в качестве топлива, а в основном просто сжигалась на золу [7–9]. Экономически оправданным является механическая переработка отходов с последующим использованием полуфабриката в качестве компонента для различных материалов, в том числе строитель-

ных. Положительный опыт накоплен при решении материаловедческих аспектов при получении фибролита, древесно-стружечных, древесноволокнистых и ориентировано-стружечных плит. Наиболее инновационным является глубокая переработка отходов, направленная на получение целлюлозного компонента с последующим их использованием в различных отраслях: от фармакологии до производства бумаги [10–12]. В строительстве подобные технологии опробованы при разработке фиброцементных изделий.

Многие из этих отходов и побочных продуктов содержат лигноцеллюлозу, а в основном они содержат целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозу и экстрактивные вещества, такие как фенольные соединения и минеральный компонент (зольный остаток). Технически полезные вещества содержатся практически во всех сырьевых источниках данной группы и отличаются свойствами и выходом конечного продукта [13–15]. Композиционные материалы, созданные на основе отходов деревообработки и связующих на основе лигнина, являются перспективным инновационным направлением. С применением этих компонентов возможно получение широкой номенклатуры строительных материалов: отделочных и теплоизоляционных. Регулирование пористой структуры делает возможным также получение акустических материалов и, в частности, звукопоглощающих.

Лигнин является компонентом всех материалов рассматриваемой группы и может рассматриваться как экологически безопасное связующее: нетоксичное и биоразлагаемое. Применение лигнина минимизирует негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [16]. В результате обработки древесины и варки целлюлозы получение лигнина как побочного продукта находится на уровне 70 млн тонн [17], что делает экономически целесообразным его утилизацию по сравнению с альтернативными связующими веществами [18].

Выделяют три основных вида лигнина как побочного продукта. Во-первых, это гидролизный лигнин. Гидролизный лигнин применяют в медицине и сельском хозяйстве. Основные возможности его использования: применение в качестве сорбентов, порообразователей, удобрений, а также в качестве добавки для структурирования почв и в качестве гербицидов. Во-вторых, этот сульфатный лигнин (крафт-лигнин) являющийся многотоннажным отходом целлюлозно-бумажной промышленности. Этот материал используется как топливо [19] или в основном размещают на полигонах захоронения отходов в огромном количестве [16, 20]. Проведенные ранее исследования показывают целесообразность модификации лигносодержащих материалов с использованием боразотных соединений [18–20].

Модификация боразотными соединениями направлена на изменение состава и свойств клеточных стенок растительного сырья, в составе которых происходит разделение лигнина и углеводного комплекса. Улучшение свойств лигнина происходит в процессе взаимодействия модификатора с гидроксильными группами лигнина, что приводит к образованию стабильных эфирных связей. Этот фактор также способствует увеличению способности лигнина соединяться с другими компонентами материала. Полученный таким образом модифицированный лигнин, возможно, может служить связующим при создании композиционных материалов [21–23].

Целью исследований является изучение возможности использования отходов деревообработки и производства бумаги, и в том числе лигносульфонатов, в качестве связующих для создания композиционных материалов.

В качестве объектов изучались образцы композиционных материалов, изготовленные путем прессования смеси опилок сосны с лигносульфонатом натрия. Активатором являлись вода (ЛСв) и модификатор, в качестве которого были приняты боразотные соединения (ЛСм). Также изучались свойства образцов, полученных путем прессования опилок сосны с нативным лигнином, модифицированным боразотными соединениями (НЛм).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве связующего использовался нативный лигнин, модифицированный боразотными соединениями (НЛм), в качестве наполнителя (и компонента, формирующего макроструктуру изделия) использовались древесные опилки. Образцы изготавливались следующим образом. Во-первых, осуществлялась варка опилок сосны фракции 5–10 мм в растворе боразотного соединения («Ксилостат») на водяной бане [16]. Температура варки 100 °С, продолжительность 1 час. Во-вторых, осуществлялось фильтрование продуктов варки. На третьем этапе осуществлялось формование сырцовых изделий и прессование модифицированных опилок. На этом этапе происходило выделение из опилок модифицированного лигнина. Этот модифицированный лигнин выполнял функцию естественного связующего. Отметим, что выделение лигнина из исходного сырья хвойных пород применяется в технологии твердых древесноволокнистых плит, свойства которых формируются при теплокомпрессионной обработке волокнистых листов с выделением и последующим отверждением лигнина.

На предварительном этапе испытаний серии образцов изготавливались в виде кубиков 50×50×50 мм. Варьируемыми факторами являлись параметры суш-

ки: при температуре 25 °С в стандартных условиях, а также в сушильном шкафу: тепловая обработка при 105; 125 и 150 °С до постоянной массы. После формования сырцовых образцов ЛСв и ЛСм в виде кубиков 50×50×50 мм осуществлялось их прессование под давлением 80 кПа. В качестве факторов отклика принимались прочности на сжатие при 10% относительной деформации и при изгибе, средняя плотность и теплопроводность. Испытания свойств проводились через 30 суток.

Образцы на основе связующего, в качестве которого был применен лигносульфонат натрия (ЛСв), изготавливались путем его смешивания с опилками хвойных пород фракции 5–10 мм и водой. Соотношение компонентов по массе: опилки/ лигносульфонат (ЛС)/вода в пропорции 1:1:0,5. Образцы на основе связующего, содержащего боразотные соединения (БАС) и ЛСм в качестве модификатора, изготавливались путем смешивания опилок хвойных пород фракции 5–10 мм с лигносульфонатом натрия, модифицированным раствором БАС. Соотношение компонентов по массе: опилки/лигносульфонат/модификатор в пропорции 1:1:1. Исследования на втором уровне испытания проводились с помощью цифровых методик.

Часть исследований проводилась на оборудовании Центра коллективного пользования (ЦКП) НИУ МГСУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытания на предварительном уровне показали увеличение прочности с повышением температуры

сушки для образцов с модифицированным лигнином (НЛм) в качестве связующего. При сопоставимой плотности образцов прочность на сжатие при 10% относительной деформации составила 1,36 МПа у образцов, сушившихся при 150 °С, и 0,44 МПа у образцов, сушившихся при нормальных условиях и 25 °С. Прочность на сжатие при 10% деформации для образцов с ЛСв значительно выше, нежели с НЛм: 2,62; 2,94 и 2,57 МПа соответственно при сушке при 25 °С, 105 °С и 125 °С. Образцы на связующем модифицированным боразотным соединением обладают лучшими биоцидными свойствами, а прочность их (при 10% деформации) в 1,45–1,52 раза выше и составляет: 4,06; 4,51 и 4,33 МПа соответственно при сушке при 25 °С, а также при 105 °С и 125 °С.

Предварительный анализ экспериментальных данных позволил установить крайний предел температуры тепловой обработки, которая не должна превышать 105 °С на материале (и 125 °С в объеме сушильной камеры). При больших температурах возможно закипание воды в материале (как результат фазового перехода). Результаты прочностных испытаний при сжатии представлены на рис. 1.

Учитывая опыт, полученный на предварительном этапе эксперимента, план дальнейших исследований базировался на применении материалов с использованием в качестве связующего лигносульфоната, модифицированного боразотными соединениями (ЛСм). Исследования проводились на основе математического планирования и статистической обработки результатов эксперимента [24, 25].

В качестве варьируемых факторов были приняты средний размер опилок хвойных пород (X_1), расход

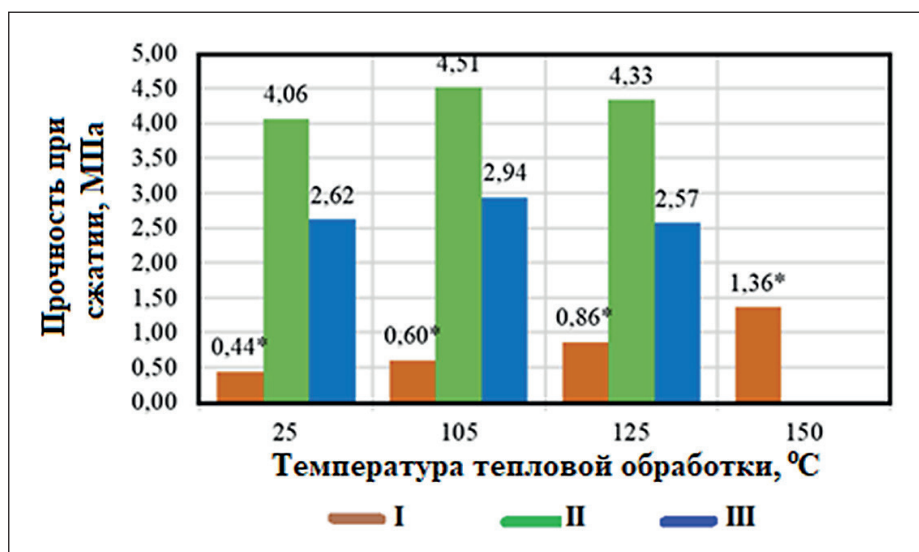


Рис. 1. Результаты прочностных испытаний (прочность при сжатии при 10% деформации): I – образцы с НЛм, средней плотностью 560 кг/м³; II – образцы с ЛСм, средней плотностью 830 кг/м³; III – образцы с ЛСв, средней плотностью 690 кг/м³

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

модификатора к массе сухих опилок (X_2) и температура среды в камере при тепловой обработке (X_3). Размеры опилок хвойных пород имеют одномодальное распределение по размерам, близкое к нормальному. Поэтому за средний размер принимается величина математического ожидания распределения опилок по размерам (средний размер). При проведении эксперимента учитывалось, что на начальных стадиях тепловой обработки температура материала отстает от температуры среды в камере, но при дальнейшем тепловом воздействии разница температур становится минимальной.

Обработка результатов эксперимента и проверка статистических гипотез осуществлялась в программе Statistika. Обработка осуществлялась с применением методики «Аналитической оптимизации», разработанной в НИУ МГСУ и опробованной при решении рецептурных задач и выбора технологических параметров многих строительных материалов [26, 27]. Условия эксперимента приведены в таблице 1.

Функциями отклика рассматриваются прочность при сжатии при 10% деформации (Y_1), прочность при изгибе (Y_2), средняя плотность (Y_3). В качестве параметра оптимизации принята прочность при изгибе.

Доверительный интервал для коэффициентов уравнений регрессии (Δb) определялся по значениям критерия Стьюдента (выбранным для трех степеней свободы) и дисперсии параллельных опытов. Значимость коэффициентов уравнений регрессии оценивалась путем их сравнения (по абсолютной величине) с доверительным интервалом. Коэффициенты, меньшие доверительно интервала, принимались незначимыми и приравнивались к 0. Проверка адекватности полученных полиномов осуществлялась по критерию Фишера (сравнением расчетных и табличных значений). В результате получены следующие уравнения регрессии:

– для прочности при сжатии при 10% деформации ($\Delta b_1 = 0,22$ МПа):

$$Y_1 = 4,1 + 0,4X_1 + 0,6X_2 + 0,3X_3 + 0,2X_1X_2 - 0,2X_3^2, \quad (1)$$

– для прочности при изгибе ($\Delta b_2 = 0,16$ МПа):

$$Y_2 = 2,9 + 0,3X_1 + 0,4X_2 + 0,2X_3 + 0,2X_1X_2, \quad (2)$$

– для средней плотности ($\Delta b_3 = 4$ МПа кг/м³):

$$Y_3 = 676 + 12X_1 + 8X_2 + 6X_1X_2. \quad (3)$$

Анализ коэффициентов уравнений регрессии (1, 2, 3) позволяет оценить влияние каждого фактора на результат в установленных для эксперимента интервалах (см. табл. 1). Увеличение размера опилок хвойных пород (X_1) предопределяет как увеличение прочности при сжатии и при изгибе и приводит к некоторому увеличению средней плотности. Увеличение прочности связано с геометрическим фактором, обеспечивающим увеличение количества контактов между частицами древесины, омоноличиваемых связующим, а увеличение средней плотности связано с влагоемкостью опилок. Расход модификатора (X_2) влияет на прочностные характеристики в наибольшей степени, что связано с повышением прочностных характеристик как модифицированного связующего, так и подвергающихся естественной пропитке частиц древесины. Повышение температуры тепловой обработки, которая проводилась в лабораторном эксперименте в сушильном шкафу, практически не влияет на среднюю плотность образцов (коэффициент оценки меньше доверительного интервала, а следовательно, меньше ошибки эксперимента), но оказывает значительное влияние на прочностные характеристики.

Анализ коэффициентов при X_1 в уравнении (1) показывает, что зависимость прочности при сжатии от температуры носит ярко выраженный нелинейный характер: рост прочности при повышении температуры тепловой обработки сначала увеличивается (коэффициент при X_1 , равный 0,3), а при превышении температурой определенного значения начинает снижаться (коэффициент при X_1^2 , равный минус 0,2). Рост прочности обусловлен реакциями между модифицированным лигнином, модификатором, а также в поверхностном слое древесных частиц, а тенденция к снижению прочности связана с фазовым переходом воды в пар и разрыхлением структуры.

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Размер опилок хвойных пород l , мм	X_1	8	2	6	10
Расход модификатора C_c , %	X_2	6	2	4	8
Температура тепловой обработки, °C	X_3	85	25	60	110

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Определить величину допустимого порога температуры тепловой обработки возможно при использовании метода аналитической оптимизации. В это случае уравнения (1–3) рассматриваются как алгебраические полиномы: функции двух или трех переменных, к которым допустимо применение методов математического анализа для непрерывных функций. Порядок реализации метода следующий:

1) Определяем экстремум функции (1) по X_3 :

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0,3 - 0,4X_3 = 0 \rightarrow X_3 = 0,75.$$

2) Решаем уравнения (1–3) при $X_3 = 0,75$:

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 4,2 + 0,4X_1 + 0,6X_2 + 0,2X_1X_2, \quad (4)$$

– для прочности при изгибе:

$$Y_2 = 3,0 + 0,3X_1 + 0,4X_2 + 0,2X_1X_2. \quad (5)$$

Для средней плотности ($\Delta b_3 = 4$ МПа кг/м³) уравнение (3) не изменилось.

3) Определяем величину пороговой температуры тепловой обработки в натуральных единицах (с использованием данных табл. 1):

$$t_{\text{п}} = 85 + 25 \times 0,75 = 103\text{--}104 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4) Осуществляем графическую интерпретацию уравнений (3, 4, 5), результаты представлены в виде номограммы (рис. 2). Номограмма содержит три сектора: сектор I позволяет оценить прочность при изгибе R_s , МПа; сектор II – прочность при сжатии

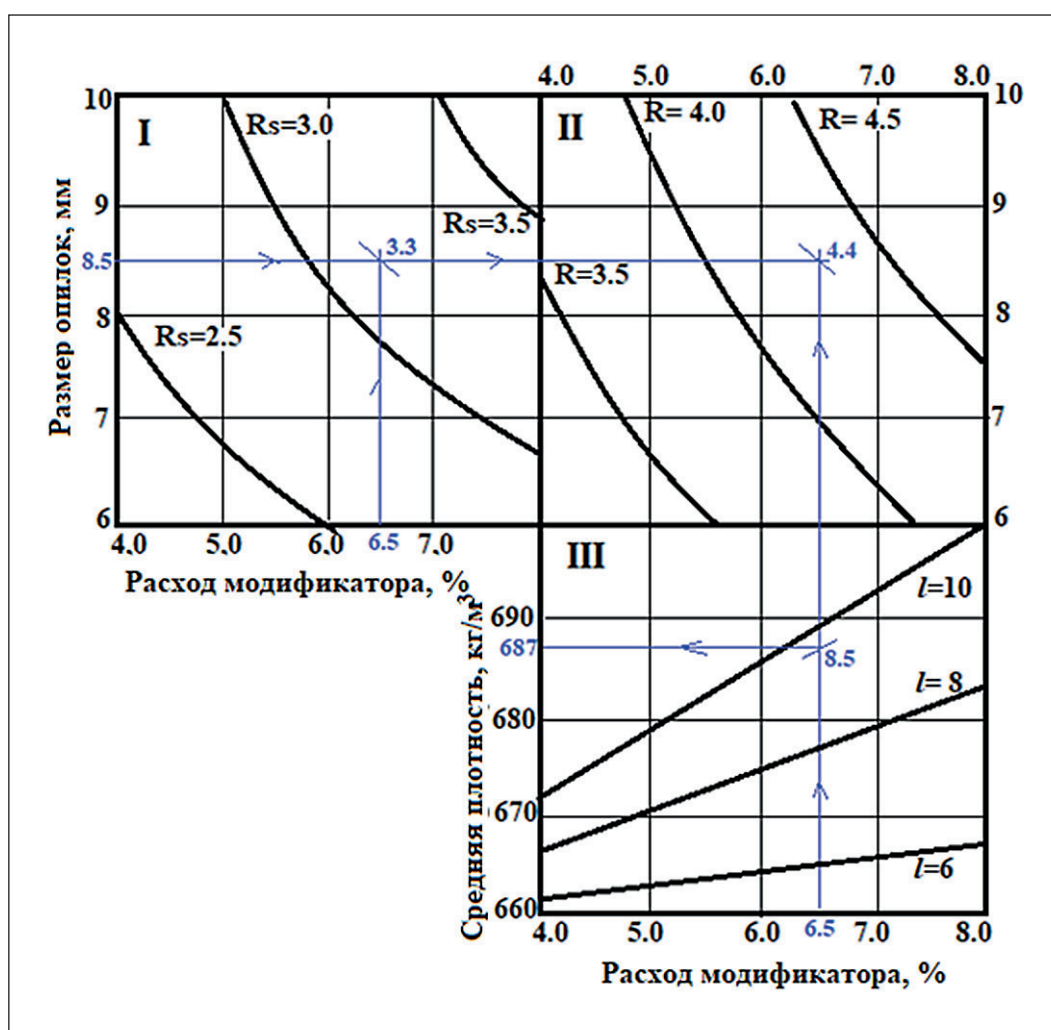


Рис. 2. Номограмма для оценки свойств материала при оптимизированной температуре тепловой обработки 103–104 °C; сектора: I – прочность при изгибе R_s , МПа; II – прочность при сжатии при 10% деформации R , МПа; III – средняя плотность ρ , кг/м³

при 10% деформации R , МПа; сектор III — среднюю плотность образцов ρ , кг/м³.

Решение прогностической задачи графическим способом заключается в следующем. На осях координат отмечают точки значений варьируемых факторов (в натуральном измерении). В примере (рис. 2, синие линии) заданы средний размер опилок хвойных пород l , 8,5 мм и расход модификатора C_c 6.5%. Отмечаем эти точки на осях координат. Из точки $l = 8,5$ мм проводим через секторы I и II прямую, параллельную оси абсцисс. В секторах I и II из точек $C_c = 6.5\%$ проводим прямые параллельные оси ординат. В секторе I на пересечении прямых определяем величину прочности при изгибе ($R_s = 3.3$ МПа), а в секторе II — аналогично прочность при сжатии при 10% деформации ($R = 4.4$ МПа). Далее в секторе III получаем значение средней плотности. Находим точку пересечения прямых «расхода модификатора» и «размеров опилок» и из этой точки проводим линию, параллельную оси абсцисс, и получаем значение средней плотности (ρ), равной 687 кг/м³.

Прогностическая задача может быть также решена с помощью программы для ЭВМ с использованием оптимизированных алгебраических функций двух переменных (формулы 4–6) или базовых полиномов 1–3.

Алгоритм программы включает следующие блоки, реализуемые последовательно. Блок 1 предусматривает введение факторов в натуральных единицах и их кодирование, то есть приведение к интервалу $[-1; +1]$. Второй блок — расчетный и предполагает использование либо базовых полиномов, либо оптимизированных функций. Третий блок обеспечивает вывод результатов расчета на дисплей компьютера и на печать.

При использовании методик цифрового моделирования очень важным является подтверждение адекватности полученных математических (статистических) моделей реальным процессам. Проверка осуществляется на двух уровнях. Во-первых, при статистической обработке адекватность полиномов проверяют по критерию Фишера. Во-вторых, после получения расчетных результатов реализуется повторный активный эксперимент и проводится оценка расхождения между расчетными значениями и результатами эксперимента (табл. 2).

После получения расчетных результатов аналитическим путем (с помощью программы для ЭВМ или графического метода) осуществляется дополнительная проверка в повторных сериях активного эксперимента. В качестве оценочного критерия принимается прочность при изгибе (МПа). Результаты сравнительного анализа при оптимизированной температуре тепловой обработки 103–104 °С представлены в таблице 2.

Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями величин по прочности при изгибе (Δ) не превышает 7,0%, что вполне соответствует принятому в строительном материаловедении уровню точности (до 10%). Наилучшие показатели соответствуют значениям варьируемых факторов в опыте № 4: средний размер опилок хвойных пород 8,0 мм и расход модификатора 7,5%. Этим условиям соответствуют расчетные значения прочности при сжатии при 10% деформации 4.7 МПа и средней плотности 683 кг/м³, полученные с использованием аналитических зависимостей 1 и 3.

Помимо возможности получать материалы с максимально высокими характеристиками прочности при средней плотности не более 700 кг/м³,

Таблица 2. Проверка адекватности второго уровня

№	Варьируемые параметры		Прочность при изгибе (МПа)		
	Размер опилок хвойных пород, мм	Расход модификатора C_c , %	Расчетная	Реальная	Δ , %
1	9,5	7,5	3,9	3,7	5,3
2	9,5	4,5	2,7	2,9	6,8
3	8,0	6,0	3,0	3,1	3,3
4	8,0	7,5	3,4	3,5	2,9
5	8,0	4,5	2,6	2,7	3,6
6	9,5	6,0	3,3	3,2	3,0
7	6,5	6,0	2,7	2,6	3,7
8	6,5	4,5	2,5	2,6	3,8
9	6,5	7,5	2,9	2,7	6,9

использование лигносульфонатов предпочтительнее по экономическим соображениям. Использование модифицированных лигносульфонатов предполагает меньшую трудоемкость производства, а также безотходность технологии. После выделения модифицированного лигнина в водяной бане опилки процеживаются, и большая часть раствора утилизируется. К тому же полученный композиционный материал на основе опилок и модифицированного лигнина можно считать полностью изготовленным из вторичного сырья отходов деревообработки и побочных продуктов целлюлозно-бумажной промышленности.

ВЫВОДЫ

Полученные изделия вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным теплоизоляционным материалам, и использование в качестве модификатора боразотных соединений не только влияет на механические свойства изделий, но и позволяет повысить стойкость полученного материала по отношению к процессам гниения и другим биологическим воздействиям.

Использование лигносульфонатов также предпочтительнее в использовании по экономическим соображениям в связи с меньшей трудоемкостью производства, а также с безотходностью технологии. Полученный композиционный материал на основе

опилок и модифицированного лигнина можно считать полностью изготовленным из отходов древесной и целлюлозно-бумажной промышленности.

Использование лигносульфоната натрия в качестве модифицированного связующего в композиционных строительных материалах на основе древесных отходов является перспективным направлением. Доступность и низкая стоимость делают лигносульфонаты привлекательным вариантом для замены традиционных связующих веществ, например фенолформальдегидных смол и прочих фенолосодержащих соединений.

Целесообразным является применение боразотных соединений в качестве модификатора, введение которого как улучшает прочностные характеристики изделия, так и снижает опасность загнивания опилок хвойных пород, что способствует повышению эксплуатационной стойкости изделий.

Полное осуществление потенциала применения лигносульфонатов в качестве связующего и боразотных соединений в качестве модификатора предполагает дальнейшие исследования, разработки и испытания, направленные на оптимизацию его свойств. Применение цифровых методов позволяет получать достоверные результаты при минимальном количестве активных экспериментов, а также способствует оптимизации рецептур и параметров производства композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020;6:2-7. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-06-2-7> – EDN: G1HEPB.
2. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медникова Е.А. *Энергетическая эффективность строительных систем*: ООО «Научно-издательский центр Инфра-М», 2022;329. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-017479-2. <https://doi.org/10.12737/1856852> – EDN: OUWLAU.
3. Тер-Закарян К.А., Сабу Т., Жуков А.Д., Блесси Б., Бессонов И.В., Пережогин Ю.Д. Системы бесшовной изоляции для арктических условий. *Строительные материалы*. 2025;5:5-12. <https://doi.org/10.316559/0585-430X-2025-5-5-12> – EDN: YCCXDO.
4. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021;13(21):3698; <https://doi.org/10.3390/polym13213698> – EDN: HHPQWN.
5. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее. *Вестник МГСУ*. 2017;1(100):9-16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16> – EDN: XRJBSV.
6. Sagar B.M., Islam Md.M., Habib Md.L., Ahmed S., Sahadat Hossain Md. Utilization of natural and waste sources for synthesis of cellulose, chitin, and chitosan for a suitable environment. *RSC Advances*. 2025;32(15):26276-26301. <https://doi.org/10.1039/d5ra02896e> – EDN: FSMGCW.
7. Mondal P., Mondal M., Chakraborty J., Sing N., Ghosh B., Roy S., Mahali K. Advances in upcycling waste cellulose into functional materials: strategies, challenges, and emerging applications – A comprehensive review. *Next Research*. 2025;4(2):100768. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100768> – EDN: VSNXHO.
8. Karmanov A.P., Kocheva L.S., Belyy V.A. Topological structure and antioxidant properties of macromolecules of lignin of hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Polymer*. 2020;202:122756. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122756> – EDN: RUFFOH.

9. Hasheminya S.M., Dehghannya Ja. Chemical composition, antioxidant, antibacterial, and antifungal properties of essential oil from wild *Heracleum rawianum*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021;31:101913. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101913> – EDN: LBHDTB.
10. Gong Ch., Ju Zh., Lin Q., Lv X., Smith R.L., Xu L., Cao Ya., Shuai Li., Fang Zh. One-step valorization of cellulose acetate plastic waste into 5-hydroxymethylfurfural. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2026;381:125880. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.125880> – EDN: VFUVGZ.
11. Palaniappan M., Palanisamy S., Tadepalli S. [et al.] Extraction and characterization of cellulose from *Anacardium occidentale* shells: A sustainable approach to industrial waste management. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;320:146120. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146120> – EDN: ICIAES.
12. Kassab Z., Abdellaoui Y., Salim M. H., El Achaby M. Cellulosic materials from pea (*Pisum Sativum*) and broad beans (*Vicia Faba*) pods agro-industrial residues. *Materials Letters*. 2020;280:128539. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128539> – EDN: FVVERX.
13. Mohamad Haafiz M.K., Eichhorn S.J., Hassan Azman, Jawaid M. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. *Carbohydrate Polymers*. 2013;2:628–634. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.035>
14. Hosseini S.S., Moradi A.M., Javid A.H., Mahvi A.H. From waste to water savior: Fe–Mn-boosted waste-derived cellulose for sustainable tetracycline treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;327:147286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147286> – EDN: HWOKBB.
15. Saha P., Ghosh S.K., Singh P. A holistic review on synthesis, properties, and multifunctional applications of cellulose aerogels from cellulose waste streams. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;321:146334. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146334> – EDN: LVBJUJ.
16. Кондрашов М.В., Степина И.В. Теоретические основы использования лигнина в качестве связующего для композитных строительных материалов. *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023: Сборник докладов IV Национальной научной конференции, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет)*. 2024:185–189. – EDN: NCUAAD.
17. Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Романчева И.С., Савельев А.С. Использование лигнина при получении современных материалов. *Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства : IV Международная научная экологическая конференция (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины)*, Краснодар, 24–25 марта 2015 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет. 2015:285–287. – EDN: UDPVTB.
18. Усова К.А., Захаров П.С., Шкуро А.Е. Перспективные направления применения лигнина в производстве полимерных и композиционных материалов. *Молодой ученый*. 2023;8(455):11–16. – EDN: HMZKHS.
19. Симикина А.А., Челышева И.Н., Плотников Н.П. Применение лигнина в производстве древесно-полимерных композитов. *Вестник КрасГАУ*. 2013;1(76):162–169. – EDN: PUXIHR.
20. Цветков М.В., Салганский Е.А. Лигнин: направления использования и способы утилизации (обзор). *Журнал прикладной химии*. 2018;91(7):988–997. <https://doi.org/10.1134/S0044461818070095> – EDN: XZIFIT.
21. Степина И.В., Содомон М., Кононов Г.Н., Петухов В.А. Компонентный состав модифицированного растительного сырья. *Инженерный вестник Дона*. 2022;9(93):223–231. – EDN: DNXAFF.
22. Stepina I., Sodomon M., Semenov V. [et al.] Modifying *Heracleum sosnowskyi* Stems with Monoethanolamine(N→B)-trihydroxyborate for Manufacturing Biopositive Building Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;170:45–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_5
23. Патент на полезную модель № 217420 U1 Российская Федерация, МПК В27К 3/52. Биостойкий теплоизоляционный композит на основе растительного сырья Гераизол : № 2022121630 : заявл. 09.08.2022 : опубл. 31.03.2023 / И.В. Степина, М. Содомон.
24. Жуков А.Д., Артеменко С.О., Жук П.М., Боброва Е.Ю., Медведев А.А. Малоэнергоёмкое связующее для изделий на основе каменной ваты. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(4):377–388. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-377-388> – EDN: BORGVT.
25. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bessonov I.V. [et al.] Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers*. 2022;14(21):4688. <https://doi.org/10.3390/polym14214688> – EDN: JPQEWQ.
26. Kozlov S., Efimov B., Zinovieva E. [et al.] Optimization of foamed plastic technology. *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, 18–21 апреля 2019 года. Vol. 97. – Tashkent: EDP Sciences. 2019:06010. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/20199706010> – EDN: YSIYLI.*

27. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.B. [et al.] Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10–12 декабря 2018 года. Vol. 110.* – St. Petersburg: EDP Sciences. 2019:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032> – EDN: HGSKBP.

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

Степина Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; старший научный сотрудник Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, sudeykina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

Жуков Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, член-корреспондент Российской инженерной академии, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация, lj211@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, vvstrokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

Баженова Софья Ильдаровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, bazhenovasi@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6111-201X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Степина И.В. – научное руководство, разработка концепции исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Жуков А.Д. – разработка концепции исследования, развитие методологии и её адаптация к задачам исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Строкова В.В. – научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

Баженова С.И. – развитие методологии, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 03.04.2026.

Original article

CC BY 4.0

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>

Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin

Tatiana V. Shilova* , Oksana A. Ivanova , Aleksander S. Serdyukov 

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: shilovatanya@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In complex geotechnical conditions during construction and operation of engineering structures, polyurethane compositions are used to strengthen loose soils. Analysis of current research has shown that the effect of polymers on sandy soil filtration properties is poorly studied. The purpose of this study is to determine the dependence of permeability and microstructure of chemically strengthened sand on the treatment method, polyurethane resin consumption and external compressive loads.

Methods and Materials. Experiments are carried out with fine and medium-grained sands. Two-component highly elastic and one-component polyurethane resins are used for strengthening. Their main purposes are soil stabilization, waterproofing, and formation of cutoff curtains. The effect of the resins on rock permeability and microstructure is assessed based on the experimental results. The experiments include formation of the polymer-sand mixtures using one-solution and two-solution resin treatments with resin/rock volume ratios of 0.05–0.25, microstructure study and filtration tests under various sample loading conditions. **Results and discussion.** The dependence of the sand permeability on the method of strengthening with polyurethanes has been determined. In the case of one-solution treatment with highly elastic resin with composition/rock volume ratio of 0.2, the permeability of the samples is $7\text{--}13 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. A two-fold decrease of the resin content causes an increase in permeability by 1–2 orders of magnitude. Such behavior is explained by the structure in which open intergranular pores predominate and form connected pore channels. The addition of a small volume of a one-component rigid polyurethane composition reduces sand permeability by 1.5–3.2 times and improves the stability of samples under compressive loads. **Conclusion.** The practical significance of the results consists in the increasing efficiency of sand filtration properties reduction with polyurethane resins strengthening. The proper choice of a chemical treatment method with consider of the geotechnical problem provides both effective rock permeability reduction and decrease in the consumption of expensive polymer compositions for the construction of cutoff curtains and screens in the rock mass.

KEYWORDS: sand, polyurethane compositions, permeability, chemical strengthening, geomaterial, microstructure, compressive load, treatment method

ACKNOWLEDGEMENTS: Financial support for this work was provided by the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region, Russia under the grant No. 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/>.

FOR CITATION:

Shilova T.V., Ivanova O.A., Serdyukov A.S. Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin. *Nanotechnology in Construction*. 2026;18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами

Татьяна Викторовна Шилова* , Оксана Александровна Иванова , Александр Сергеевич Сердюков 

Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В сложных геотехнических условиях при строительстве, эксплуатации инженерных объектов используют укрепление несвязных грунтов полиуретановыми составами. Анализ современных исследований показал, что влияние полимеров на фильтрационные свойства песчаного грунта изучено недостаточно. Целью работы является определение особенностей изменения проницаемости и микроструктуры химически укрепленного песка в зависимости от способа обработки, расхода полиуретановых смол и внешних сжимающих нагрузок. **Методы и материалы.** Эксперименты проводили с мелкими, среднезернистыми песками. Для укрепления использовали двухкомпонентную высокоэластичную и однокомпонентную полиуретановые смолы, основное назначение которых – усиление грунтов, гидроизоляция, формирование противофильтрационных завес. Влияние составов на проницаемость и микроструктуру породы оценивали по результатам экспериментов, которые включали формирование смесей полимер-песок способами однорастворной и двухрастворной обработки смолами при объемном соотношении жидкий состав/порода – 0,05–0,25, исследование микроструктуры, проведение фильтрационных тестов при различных условиях нагружения образцов. **Результаты и обсуждение.** Определены особенности изменения проницаемости песка в зависимости от способа укрепления полиуретанами. В случае однорастворной обработки высокоэластичной смолой при объемном соотношении состав/порода – 0,2, проницаемость образцов составляет $7\text{--}13 \cdot 10^{-3}$ мкм². Двукратное уменьшение содержания смолы приводит к повышению проницаемости на 1–2 порядка, поскольку в структуре преобладают открытые межзерновые пустоты, формирующие связанные поровые каналы. Добавка малого объема однокомпонентного жесткого полиуретанового состава снижает проницаемость песка в 1,5 – 3,2 раза и повышает устойчивость образцов в условиях сжимающих нагрузок. **Заключение.** Практическая значимость результатов состоит в повышении эффективности использования полиуретановых смол для задач снижения фильтрационных свойств песков. Выбор способа химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи обеспечит как эффективное снижение проницаемости пород, так и уменьшение расхода дорогостоящих полимерных составов при возведении противофильтрационных завес и экранов в массиве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: песок, полиуретановые составы, проницаемость, химическое укрепление, геоматериал, микроструктура, сжимающая нагрузка, способ обработки

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шилова Т.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

INTRODUCTION

An increase in the volume of construction and intensive operation of engineering objects are complicated by hazardous exogenous processes, that include flooding, soil subsidence and erosion, associated with groundwater [1, 2]. A loose structure and high permeability of sandy soils cause negative processes such as an intense fluid filtration, liquefaction and subsidence. In complex geotechnical conditions, physical and chemical methods are used to improve operational properties of soils. Loose and dis-

turbed rocks are often strengthened using chemical reagents that interact with each other and/or groundwater. Among them polymer resins are common [3–6]. Unlike traditional strengthening compositions (cements, sodium silicate), polymer resins well penetrate into rocks reinforcing them for the curing process. Two-component highly elastic polyurethanes are commonly used to bind loose soils, construct cutoff curtains and impermeable screens in rock mass [7–9]. In these systems, the interaction of isocyanate (component B) and a polyester compound (component A)—a mixture of polyfunctional hydroxyl-

containing polyols with a foaming agent and a catalyst—leads to the formation of a foamed polyurethane and a significant composition volume increase. Loose soil particles are bound by the cured resin, resulting in low residual porosity [10–13]. The use of foaming compositions provides low filtration properties of sandy soils after chemical strengthening. According to [14], the permeability of fine-grained sands impregnated with polyurethanes is 10^{-4} – 10^{-3} μm^2 , which corresponds to low-permeability and impermeable rock types. The analysis of current research shows that the influence of consumption, method of treatment with polymer compositions, and compressive loads on the filtration properties of loose soils are poorly studied. A large number of laboratory tests on rock strengthening and determination of their properties would make possible to predict the results of a planned natural experiments. The purpose of the study is to determine the characteristics of changes in the permeability and microstructure of chemically strengthened sand, depending on the treatment method, consumption of polyurethane compositions and external compressive loads.

METHODS AND MATERIALS

Materials

Laboratory experiments are carried out with loose rocks- fine- and medium-grained sands, that were collected from the operating open mine in the Novosibirsk District of Novosibirsk Region. Preliminary preparation of experimental samples includes drying to constant weight, sieving, and determination of the rock granulometric composition. The sand fraction with grain sizes of 0.2–0.3 mm is approximately 80% by mass. This corresponds to fine- and medium-grained sand, according to the classification from GOST 25100-2020 “Soils. Classification” [15]. The content of coarse (grain size greater than 0.5 mm) and fine (grain size less than 0.2 mm) fractions are approximately 7% and 12% by mass, respectively. The selected fraction of 0.2–0.3 mm is used for further experiments. The absolute and bulk densities of sand are determined under laboratory conditions. They

are 2.65 g/cm³ and 1.6 g/cm³, respectively. Then the average porosity coefficient of unconsolidated loose rock is estimated as 0.65. The experiments are carried out with low-moisture sand with water saturation of approximately 0.1 fractional units. Under laboratory conditions the samples are artificially moistened to achieve the required moisture content. To consolidate and chemically strengthen sand, a two-component highly elastic polyurethane resin (hereinafter SR compound) is used. It is designed for a consolidating and waterproofing of loose rock, forming impermeable screens in rock mass, and in construction – for repairing cracks in underground structures (passages, tunnels, foundations), forming impermeable barriers at the soil-concrete boundary. The SR compound is formed by mixing individual liquid components A and B in a 1:1 volume ratio to a uniform consistency. Component A is a mixture of castor oil, phenoxypropanol, and low-molecular-weight polypropylene glycol (a catalyst). Component B is a mixture of methylene diphenyl diisocyanate, polypropylene glycol, and propylene carbonate. The low viscosity, long reaction time (approximately 3.5 hours), and slow foaming of the SR compound provide penetration into small rock voids and pore channels. This causes a significant reduction in the permeability of the strengthened sand. The cured polyurethane resin is an elastic, impermeable material. Its main characteristics are showed in the Table 1 [16]. The one-component fast-cured polyurethane resin (hereinafter, FR compound) is also used in experiments to chemically strengthen sand. It is designed both to bind loose and fractured rocks for construction of underground structures, and to reduce soil permeability and to form impermeable screens in the rock mass behind building structures. The FR compound polymerizes reacting with water. In case of a liquid resin/water ratio from 1:1 to 9:1, the full curing time is 90–180 seconds (Table 1). A carbon dioxide, which is released during reaction of isocyanate with water and polymerization, causes intense foaming of the FR compound. A liquid resin/water ratio of 5:1 is used in the experiments. The full cured FR compound is a fine-pored foam material that is stable under significant loads. It has previously been obtained that

Table 1. Properties of two- and one-component polyurethane compositions [16]

Indicators	SR compound	FR compound
Purpose	Strengthening of loose soils, waterproofing, formation of impermeable curtains	Strengthening loose and unstable rocks, forming anti-seepage curtains
Volume ratio of components A to B	1:1	–
Resin : water volume ratio	–	1:1–9:1
Density (components A / B), g/cm ³	1.01/1.21 at 23 °C	1.14 at 20 °C
Viscosity (components A / B/ mixture), MPa·s	115/40/80 at 23 °C	800–1000 at 20 °C
Curing time, s	≈10800	90–180

a small adding of the fast-acting, one-component polyurethane FR compound increases strength properties of sand by 1.3 to 3 times, compared to samples strengthened with only a highly elastic resin [16]. However, a sharp increase in the viscosity during polymerization of composition can reduce the penetration zone in the strengthened soil, especially in low-permeability rocks containing fine cracks. This study aims to experimentally determine the effect of adding a fast-cured, one-component resin on the filtration properties of chemically strengthened sand.

Methods

The effect of polyurethane compounds on sand permeability is determined based on laboratory studies. The experiments include: preparation of rock samples, treatment them with polymer compounds, forming strengthened sand samples (hereinafter geomaterials), studying the microstructure, and filtration tests. In the experiments two methods of the sand “binding” with resins are used: one-solution and two-solution methods. The one-solution method includes mixing the rock sample with a prepared liquid polymer compound (SR or FR). They are being mixed until the homogeneous mixture is obtained. For both polyurethane compounds, the geomaterials are formed at liquid resin/rock ratios of 0.05; 0.1; 0.2 (Fig. 1). The two-solution method includes sequentially adding and mixing prepared SR and FR compounds with sand. Geomaterials are formed using liquid composition ratios of 0.05–0.2 (SR compound/rock) and 0.05 (FR compound/rock), respectively (Fig. 2).

In both cases, the formed sand-polyurethane resin mixtures are placed in the detachable plastic cylindrical molds with a height 80 mm and a diameter 30 mm,

kept until the polymers are fully cured, removed, and cut to 60 mm. The formed samples are used for subsequent filtration tests.

Permeability of various geomaterials is determined based on filtration experiments. The tests are carried out on the laboratory setup, which was developed at Chinalak Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. This laboratory setup is designed to measure permeability of rocks and porous materials under steady-state linear gas flow conditions and under axial and lateral compression pressures of cylindrical samples. The setup scheme, experimental methodology, and permeability determination are presented in [17, 18]. The tests are carried out with the geomaterials of 30 mm in diameter and 60 mm in height under uniform compression pressures equal to 400, 600, and 800 kPa (Fig. 3). Permeability coefficients are calculated using the expression [17, 18]:

$$k = \frac{2 \times 10^4 V \mu L P_{at}}{St \Delta P (\Delta P + 2P_{at})}, \quad (1)$$

where k is calculated permeability coefficient, mD (millidarcy, $1 \text{ mD} = 10^{-3} \mu\text{m}^2$);

μ is viscosity, mPa·s;

S is the cross-sectional area of sample, cm^2 ;

ΔP is pressure difference at the ends of the sample, 10^{-1} MPa;

P_{at} is the pressure at the outlet of the sample (atmospheric), 10^{-1} MPa;

L is the sample length, cm;

t is the filtration time, s;

V is the volume of gas passed through the sample, cm^3 .

The microstructure of chemically strengthened sand is studied using scanning electron microscopy (SEM). SEM images are used to study the distribution of het-

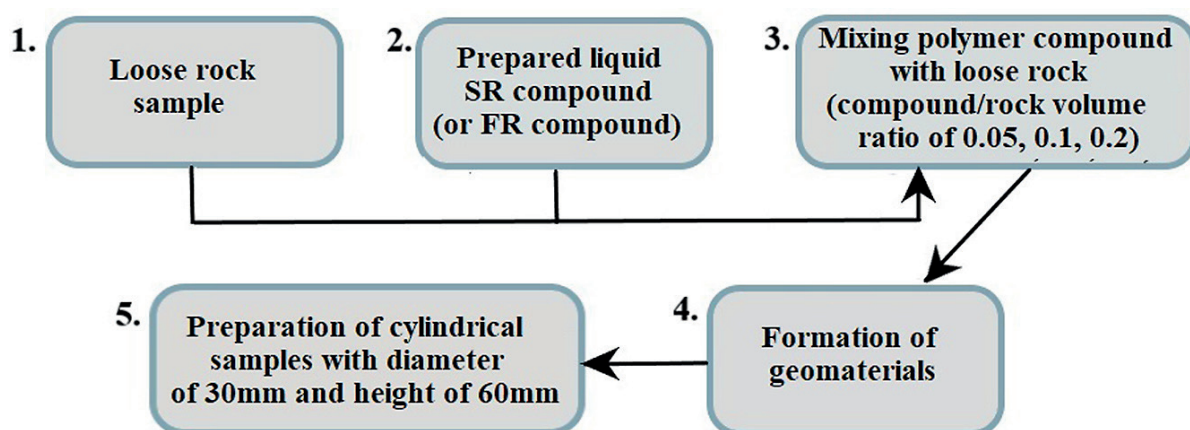


Fig. 1. One-solution method of the sand treatment with polyurethane resins: 1 – preparation of loose rock (sand) sample; 2 – preparation of SR polymer composition (or FR compound); 3 – mixing liquid solution with loose rock sample in the volume ratio of 0.05, 0.1, 0.2; 4 – placing the mixture in cylindrical molds with height 80 mm and diameter 30 mm, holding until full polymer curing, extraction of the obtained geomaterials; 5 – preparation of geomaterials for filtration tests: cutting samples to the height of 60 mm

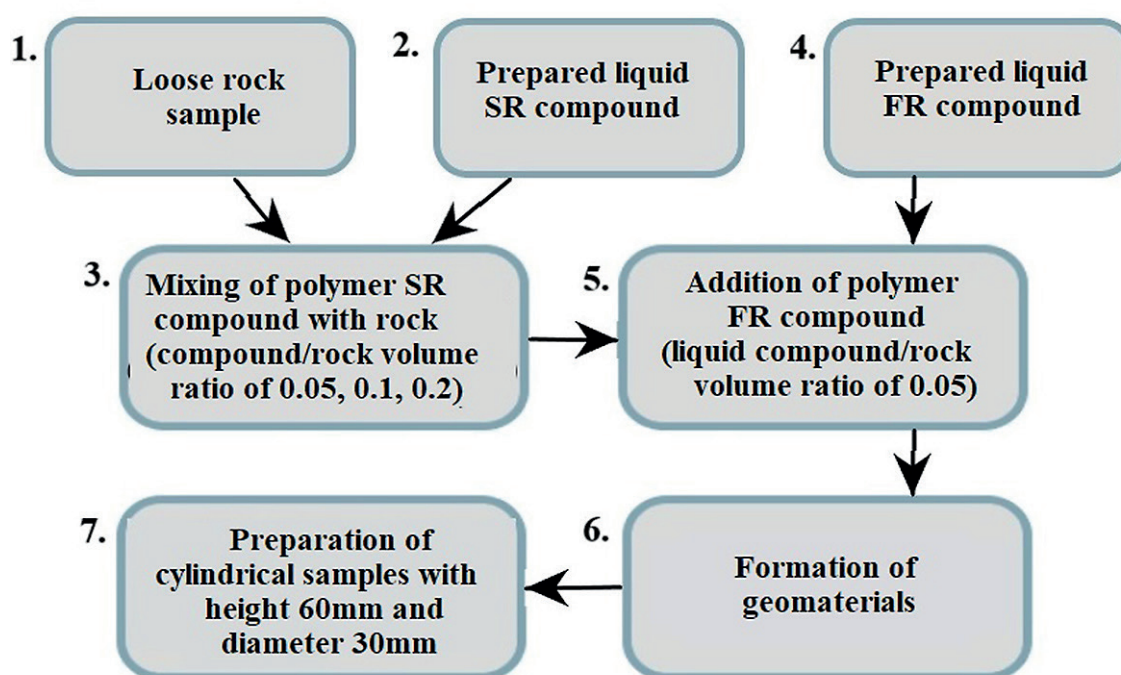


Fig. 2. Two-solution method of sand treatment with polyurethane resins: 1 – preparation of loose rock sample; 2 – preparation of SR compound; 3 – mixing liquid SR compound with loose rock sample in the ratio of 0.05; 0.1; 0.2; 4 – preparation of FR compound; 5 – addition of FR compound (liquid resin/rock volume ratio is 0.05) to sand/SR compound mixture; 6 – placing the mixture in cylindrical molds with height of 80 mm and diameter of 30 mm, holding until full curing of polymers, extraction of the obtained geomaterials; 7 – preparation of geomaterials for filtration tests: cutting samples to the height of 60 mm



Fig. 3. Geomaterials for filtration experiments. 1 – cylindrical sample of geomaterial; 2, 3 – lateral and axial compression of samples by external pressure; 4 – direction of gas filtration

erogeneities and voids, estimate the content of the cured polymers in the geomaterials, determine the pore linear dimensions, etc. The data analysis and statistical processing are carried out using the automated microstructure analyzer “Mineral C7” (SIAMS company), specialized software: the “Porosity Study” module, “Study of Pore Structure” [19, 20].

RESULTS AND DISCUSSION

A distribution of cured polyurethane compounds in sand void space, pore filling and characteristics are assessed by studying a microstructure of geomaterials using SEM-images. In the case of one-solution method of sand treatment with the liquid SR compound/rock ratio of 0.2,

the strengthened sand obtains a basal structure which is characterized by a grain distribution within the bulk of a binder (cured polymer). Void space filling with cured polymer is 54–58% (Figs. 4, 5). After polymer strengthening the sand porosity decreases by more than five times compared to unreinforced rock. The geomaterials have small closed voids within the cured polymer aggregates, ranging in size from hundreds of nanometers to several micrometers, and a few number of larger intergranular pores with average diameter of 16.5 μm . As a two- and four-fold decrease in the liquid SR compound volume to the liquid SR compound/rock ratios of 0.1 and 0.05, the content of the cured polymer decreases to 30–45%, or on average by 1.3–1.6 times (Figs. 4, 5). The microstructure of the obtained geomaterials can be described as contact,

according to the classification presented in [21]. The cured SR compound is a material, which is located at the sand grains boundaries, connecting them with single binding polymer “matrix”. The sizes of such binding aggregates are 10–20 μm (Fig. 4). The intergranular pores predominate in the structure of the geomaterials. Their diameters are average 18.3 and 20.5 μm for the samples formed at liquid SR resin/rock ratios of 0.1 and 0.05, respectively. The dependence of the cured polymer content in the pores of the geomaterials on the polymer compound/rock ratio is described by linear approximation with a high coefficient of determination $R^2 = 0.85$.

In the case of one-solution method of sand treatment with liquid FR compound/rock ratio of 0.2, the pore filling with cured polymer is 48–54% (Figs. 4, 5). The

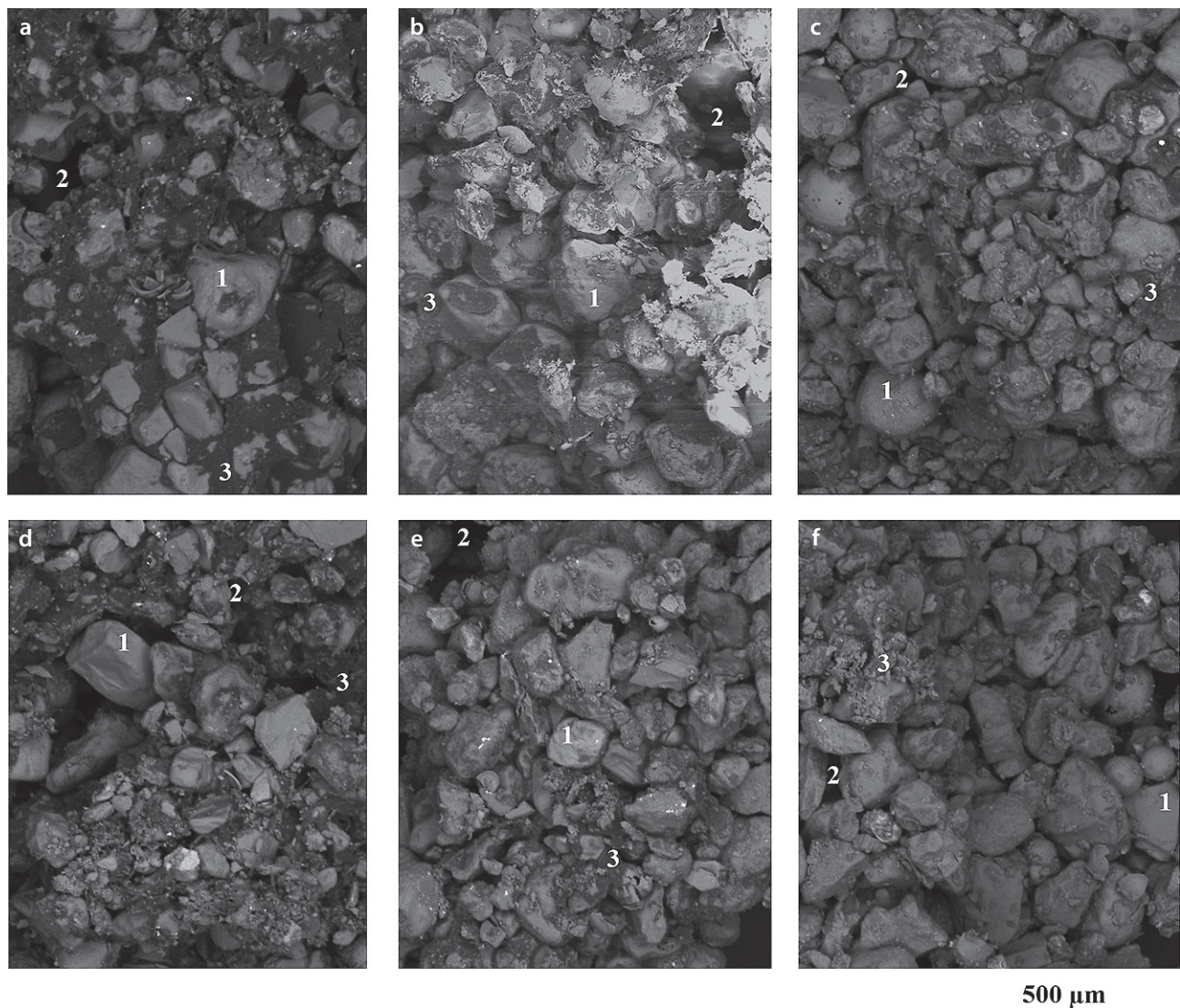


Fig. 4. SEM-images of chemically strengthened sand obtained by treatment rock with one-solution polyurethane compounds SR and FR. Ratio of liquid SR compound to rock: a – 0.2; b – 0.1; c – 0.05. Ratio of liquid FR compound to rock: d – 0.2; e – 0.1; f – 0.05. 1 – sand grains; 2 – intergranular voids; 3 – cured polymers

geomaterials have both small closed voids in the cured polymer aggregates and significant number of larger intergranular pores with average diameter of 12 μm . Reducing the volume of the liquid polyurethane FR compound to resin/rock ratios of 0.1 and 0.05, decreases the cured polymer content in the samples to 25–45%, or 1.2–1.9 times (Fig. 5). The obtained geomaterials acquire a contact structure, similar to the observed in the sand strengthened with the low-viscosity SR compound. The sizes of the binding polymer aggregates are 12–16 μm (Fig. 4). Intergranular pores predominate in the samples. Their diameters are average of 13.5 and 17 μm for geomaterials formed at FR compound/rock ratios of 0.1 and 0.05, respectively. The linear approximation of the dependence of the cured FS polymer content in the pore volume on the FR compound/rock ratio has a determination coefficient $R^2 = 0.8$ (Fig. 5).

The structures of rocks, strengthened with two-solution method, are similar to those obtained using one-solution method with low-viscosity SR compound. When using 20 vol. % Sr and 5 vol. % FR compounds, the pore space is filled with the cured polymer by 53–62%. The samples have a basal structure, in which small closed pores in the polymer aggregates are predomi-

nated. Their diameters range from hundreds of nanometers to several micrometers. As the total volume of liquid compounds decreases to 10 vol. %, the content of the cured polymers decreases, a number and size of intergranular pores increase, and the geomaterials obtain a contact structure.

Experimental studies have shown that at total volume ratios of liquid SR and FR compounds to rock not exceeding 0.15, a significant number of open intergranular pores are formed in the strengthened sand structure. Their size increases as the resin content decreases. Such voids can form interconnected pore channels in the samples, significantly affecting the filtration of liquids and gases and the permeability of the obtained geomaterials.

Laboratory experiments were performed to determine the permeability coefficients of geomaterials formed using various methods of chemical strengthening, types and volumetric flow rates of polyurethane resins. Using one-solution method of sand treatment with liquid FR compound/rock volume ratio of 0.2, permeability of geomaterials is 15–20 mD (Fig. 6). Chemically strengthened sand samples are stable under compressive loads of 400–800 kPa, and their permeability values are weakly changed. This is due to the properties of the cured one-

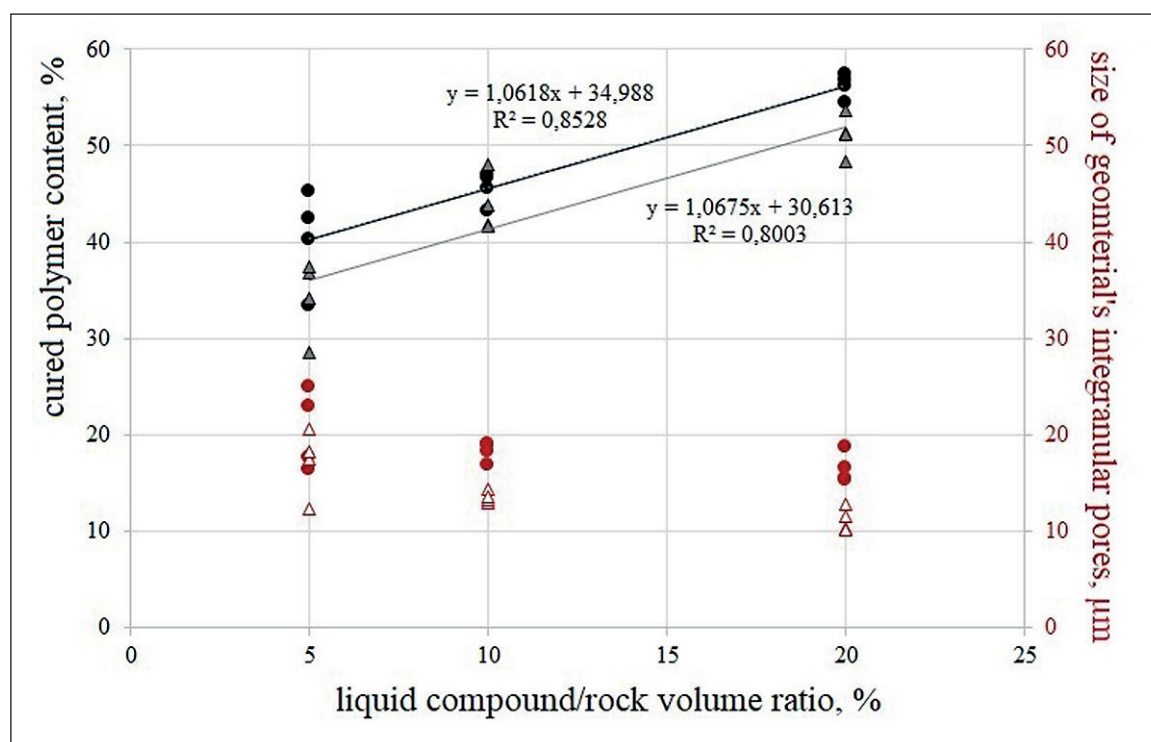


Fig. 5. Dependence of content of the cured polymers SR, FR in pores and size of intergranular pores on liquid compound/rock volume ratio according to the analysis of SEM images. Black and red circles are experimental data of study of geomaterials (content of the cured polymer and pore size, respectively), which have been obtained by one-solution treatment method with SR compound. Gray and white triangles are data of study of geomaterials (content of the cured polymer and pore size), obtained by one-solution method of sand treatment with FR composition. Black and gray lines are linear approximations of the experimental results

component FR compound, which is a rigid foamed material stable under significant loads.

For one-solution method of sand treatment with liquid SR compound/rock volume ratio of 0.2, the permeability of the samples is 7–13 mD. Filtration capacity of geomaterials decreases by approximately 1.5 times as the uniform compression pressure increases from 400 to 800 kPa (Fig. 6). This is explained by high content of highly elastic material in the samples (54–58%) – the cured polymer SR compound. It deforms under low compressive loads and leads to a decrease in the void volume in the structure. The addition of 5 vol.% liquid FS compound and two-solution treatment method cause a decrease in permeability by 1.5–1.8 times and an increase in the sample stability under compressive stress. This can be probably explained by the formation of a strengthening polymer “framework” in the rock structure from the cured FR composition, which binds the sand grains.

One-component treatment method and reduction of SR compound content to a liquid SR compound/sand volume ratio of 0.1, cause an increase in permeability by 1 to 2 orders to values of 500 to 700 mD. The obtained geomaterials are less sensitive to compressive loading, and permeability is maintained as uniform compression pressure doubles (Fig. 7). This is due to a decrease in

the content of highly elastic deformable material (cured SR compound) to 30 to 45% in the strengthened sands. The addition of 5 vol. % liquid FR compound and two-solution rock treatment method cause a significant reduction of filtration capacity of the geomaterials. Permeability values decrease by 2.9–3.2 times (Fig. 7). The obtained geomaterials are stable under uniform compression pressures of 400 to 800 kPa.

The further two-fold reduction of SR compound to a liquid resin/rock volume ratio of 0.05, has little effect on filtration properties of the chemically strengthened sand. The permeability of geomaterials obtained using one-solution treatment method reaches 520–700 mD (Fig. 8). The additional 5 vol. % of the liquid FR compound and the use of two-solution treatment method decrease sample permeability by 1.3–1.5 times. The geomaterials are stable under compressive loads of 400–800 kPa.

The obtained permeability coefficients of chemically strengthened sand are compared with values, which are typical for different soil classes and presented in [22]. It has been established that with liquid polymer compound/rock volume ratio of 0.2 or greater, regardless of the polymer type and treatment method, geomaterials have permeability typical of low-permeability and semi-permeable rocks: a sandy clays, very weakly fractured

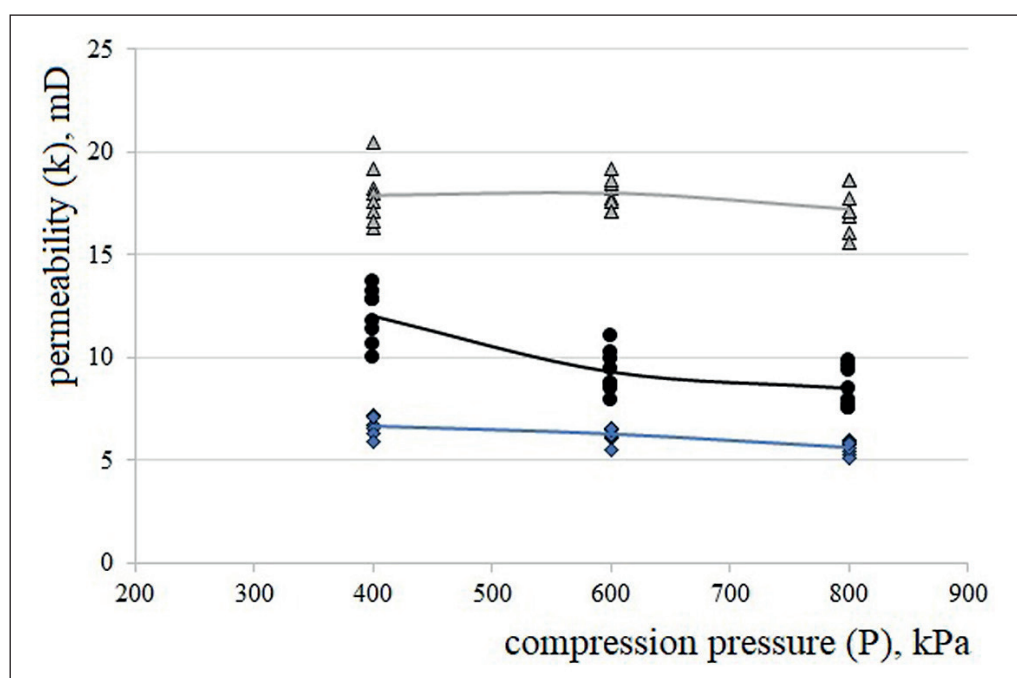


Рис. 6. Dependence of permeability of geomaterials (k) obtained with one-solution and two-solution methods of sand chemical strengthening with polyurethane SR and FR compounds on pressure of uniform compression (P). Experimental data for samples obtained with one-solution method of treatment with liquid composition/sand ratio of 0.2: black circles – strengthening with SR compound, gray triangles – strengthening with FR compound. Blue diamonds – experimental data for samples obtained with two-solution method of rock treatment with SR and FR compounds with liquid composition/rock ratios of 0.2 and 0.05, respectively. Solid lines – curves built using average values of permeability coefficients

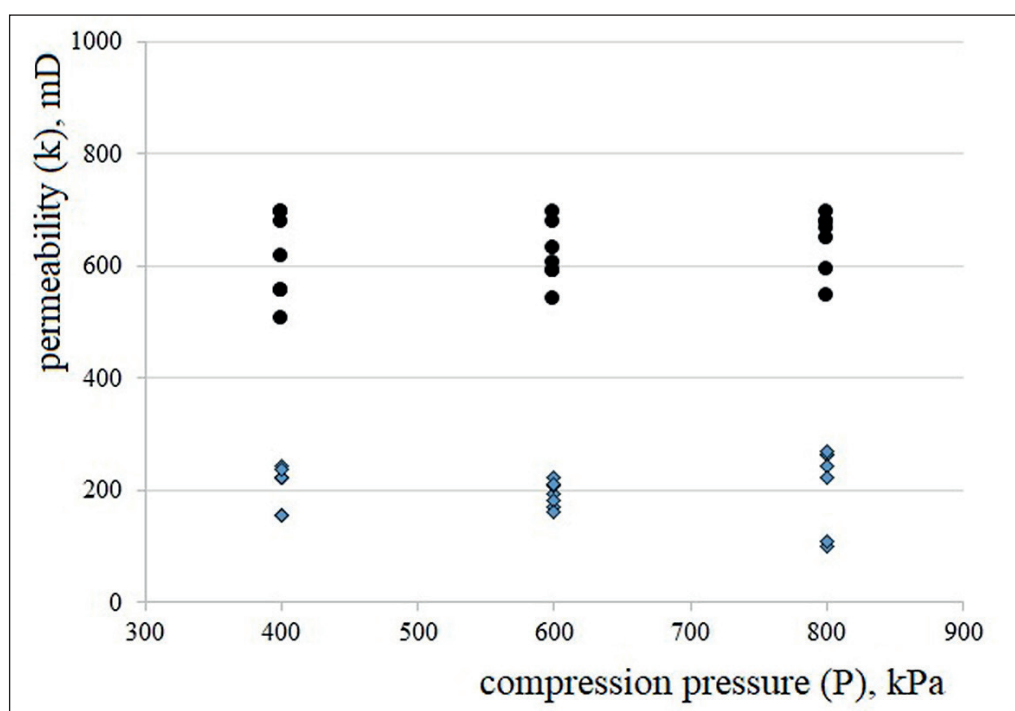


Fig. 7. Dependence of permeability of geomaterials (k) obtained using one- and two-solution methods of sand chemical strengthening with polyurethane SR and FR compounds on pressure of uniform compression (P). Black circles – experimental data for samples obtained using one-solution treatment method with liquid SR compound/rock ratio of 0.1. Blue diamonds – data for samples obtained using two-solution treatment method of rock with SR and FR compounds with liquid composition/rock ratios of 0.1 and 0.05, respectively

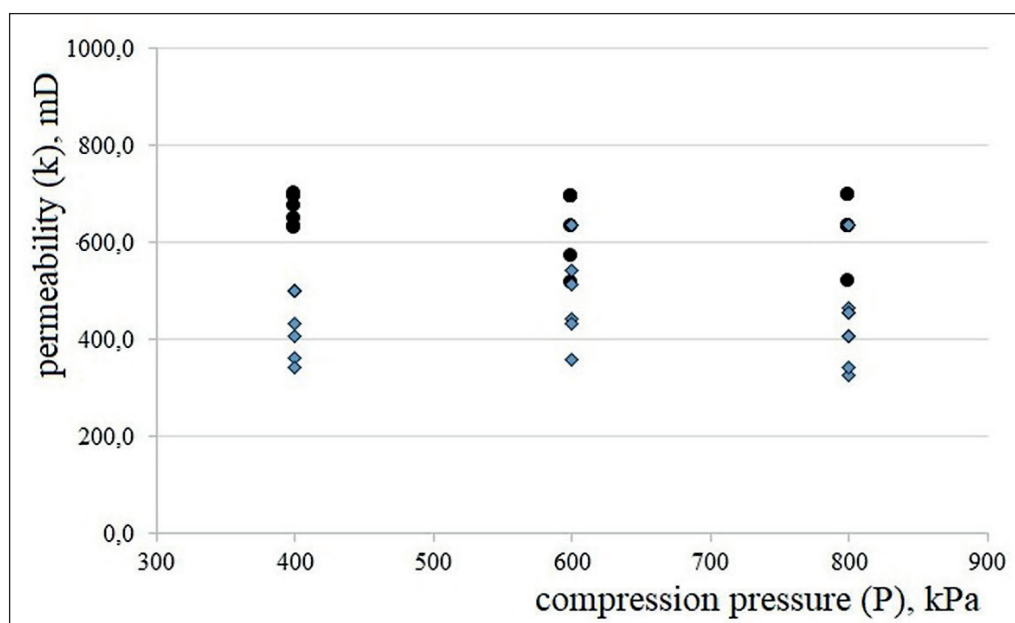


Fig. 8. Dependence of permeability of geomaterials (k) obtained using one- and two-solution methods of sand chemical strengthening with polyurethane SR and FR compounds on pressure of uniform compression (P). Black circles – experimental data for samples obtained using one-solution treatment method with liquid SR compound/rock ratio of 0.05. Blue diamonds – data for samples obtained using two-solution method of rock treatment with SR and FR compounds with liquid composition/rock ratios of 0.05 and 0.05, respectively

Table 2. Permeability of chemically strengthened sand with different treatment methods, polymer volumetric flow rates, and compression pressures

Method of sand treatment with polymer resins	Content of compounds, vol. % (SR compound; FR compound)	Average permeability value of strengthened sand, k_{av} (mD) at different compression pressures, P (kPa)		
		P = 400	P = 600	P = 800
One-solution	(20; 0)	12	9.3	8.5
One-solution	(10; 0)	614.7	618.6	644.3
One-solution	(5; 0)	665.2	635.5	636.0
Two-solution	(20; 5)	6.7	6.3	5.6
Two-solution	(10; 5)	205.0	198.2	202.4
Two-solution	(5; 5)	459.4	509.8	436.4

rocks, and loams (Table 2). A low filtration capacity can be associated with the predominance of closed voids in the structure, ranging in size from hundreds of nanometers to several micrometers, that do not form continuous pore channels.

With liquid polymer/rock volume ratio of 0.05–0.15, the obtained geomaterials exhibit permeability typical of permeable rocks [22]. The increased filtration capacity of chemically strengthened sands is associated with an increase in the number and size of open intergranular pores in the structure, which can form continuous pore channels facilitating fluid filtration.

CONCLUSION

The method of sand chemically strengthening with polyurethane compounds and the volumetric resin consumption significantly affect the filling of voids with cured polymer, residual porosity, and permeability of the obtained geomaterials. It is found that when sand is treated with two-component highly elastic polyurethane at the liquid resin/rock volume ratio of at least 0.2, the samples acquire a basal structure. It is characterized by the sand grain distribution within the bulk of the binder which is the cured polymer. The structure is dominated by small, closed voids ranging in size from hundreds of nanometers to several micrometers. At total volumetric liquid polyurethane compound/rock ratios not exceeding 0.15, open intergranular pores are common in the structure of the geomaterials. The size of such pores increases as the resin content decreases. These voids form interconnected pore channels, significantly affecting the permeability of chemically strengthened sands. The change in the permeability of the geomaterials depending on the method of sand strengthening with polyurethane resins is determined based on experimental results. It is found that in the case of one-solution treatment method of sand with two-component highly elastic resin/rock volume ratio

of 0.2, the permeability of the geomaterials ranges from 7 to 13 mD. It also decreases by approximately 1.5 times as the compressive load increases from 400 to 800 kPa. This is due to the high content of highly elastic material, which deforms under compression which causes a decrease in the void volume in the structure. The addition of 5 vol. % rigid one-component resin and the use of the two-solution treatment method cause a 1.5- to 1.8- fold decrease in permeability and an increase in the stability of the geomaterials under similar compressive stresses. It is found that the use of one-solution strengthening method and the two-fold reduction of the highly elastic resin consumption effect an increase in the permeability by 1 to 2 orders of magnitude, to values of 500–700 mD. The addition of 5 vol. % liquid one-component polyurethane compound causes a decrease in permeability by 2.9 to 3.2 times. The obtained geomaterials are stable at uniform compression pressures of 400 to 800 kPa. The further two-fold decrease in the polyurethane content to the liquid resin/rock volume ratio of 0.05 slightly affects permeability of chemically strengthened sand. Comparison of the obtained geomaterial permeability with typical soil ones has been carried out. It is found, that with a liquid polymer composition/rock volume ratio of 0.2 or more, the geomaterials have permeability characteristic to a low-permeability and semi-permeable rocks: a sandy clays, very slightly fractured rocks, loams. The practical significance of the obtained results consists in the increase efficiency of polyurethane resins to reduce the filtration properties of loose soils. The established dependencies of geomaterial permeability on sand properties, treatment method, liquid resin/rock volumetric ratios, and sample loading conditions indicate the need to choose the optimal chemical treatment method based on the current geotechnical problem. This will provide both effective reduction of the filtration properties of a loose soils and a decrease in the consumption of expensive polymer compounds when constructing impermeable barriers and screens in rock mass.

REFERENCES

1. Leonova A. *Fundamentals of hydrogeology and engineering geology: a textbook*; Tomsk Polytechnic University Publishing House: Tomsk, Russia; 2013. (in Russ.).
2. Nydner V., Mironov Y., Stavitskiy B., Beyrom S., Bogomyakov G., Byligina O., Obidin N., Rovnin L., Rozin A. *Hydrogeology of the USSR. West Siberian Plain (Tyumen Region, Omsk Region, Novosibirsk Region, Tomsk Region)*; Nedra: Moscow, Russia; 1970. Volume XVI. (in Russian).
3. Zuber S.S., Kamarudin H., Abdullah M.M.A.B., Binhussain M. Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013;7(5):258-265.
4. Firoozi A.A., Guney Olgun C., Firoozi A.A., Baghini M.S. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*. 2017;8(1):1-26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>. – EDN: MIKIBR.
5. Chang I., Prasadhi A.K., Im J., Cho G.C. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*. 2015;77:430-438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.116>
6. Ma S., Ma M., Huang Z., Hu Y., Shao Y. Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating. *Soils and Foundations*. 2023;63(3):1-17. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101299>. – EDN: ZYNOLW.
7. Saleh S., Yunus N.Z.M., Ahmad K., Ali N. Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review. *Construction and Building Materials*. 2019;202:738-752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.048>. – EDN: AKAMDJ.
8. Anagnostopoulos C.A., Aggelidis V. Factors affecting properties of polymer grouted sands. *CivilEng*. 2024;5(1):65-88. <https://doi.org/10.3390/civileng5010004>. – EDN: WLWBSQ.
9. Guo C., Sun B., Hu D., Wang F., Shi M., Li X. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019;56(3):171-177. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09586-7>. – EDN: YINLRB.
10. De Souza F.M., Kahol P.K., Gupta R.K. Chapter 1. Introduction to polyurethane chemistry. In: *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*. Pittsburg: ASC Publications; 2021.
11. Komurlu E., Kesimal A. Experimental study of polyurethane foam reinforced soil used as a rock-like material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015;7(5):566-572. <https://doi.org/10.1016/j.jr-mge.2015.05.004>
12. Wang X., Zhang F., Wu J., Qiang S., Li B., Zhang G. Diffusion Behavior of Polyurethane Slurry for Simultaneous Enhancement of Reservoir Strength and Permeability Through Splitting Grouting Technology. *Polymers*. 2025;17(18):2513. <https://doi.org/10.3390/polym17182513>. – EDN: TFGPLJ.
13. Hao M., Zhang J., Zou L., Li X., Zhong Y., Cvetkovic V. Influence of component parameters on propagation characteristics of foaming polyurethane grout in rock fractures. *Construction and Building Materials*. 2024;428:136227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136227>. – EDN: XBECLE.
14. Shilova T.V., Serdyuk I.M., Serdyukov S.V., Ivanova O.A., Serdyukov A.S. Change in permeability of loose rocks in partial impregnation with high-elastic polymer. *Journal of Mining Science*. 2024;60(1):22-28. <https://doi.org/10.1134/S1062739124010034/>. – EDN: CRBCFL.
15. GOST 25100-2020 Soils. Classification. Standardinform Publishing House: Moscow; 2021-01-01. (in Russ.).
16. Shilova T. V., Serdyukov S. V., Drobchik A. N. Experimental research of stress-strain properties of sandy soil when strengthened with polyurethane compounds. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):15-24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>. – EDN: LMLQJK.
17. Serdyukov S.V., Shilova T.V., & Drobchik A.N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks. *Journal of mining science*. 2017;53(5):954-961. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052994/>. – EDN: YBVXJJ.
18. GOST 26450.2-85 Rocks. Method of determination of the absolute gas permeability coefficient during stationary and non-stationary filtration; Standard Publishing House: Moscow; 1986-07-01. (in Russ.).
19. Siams. Available online: <https://siams.com/minerals7/?ysclid=mhvg141qb576492978> (accessed on 27 October, 2025).
20. Ni H., Liu J., Huang B., Pu H., Meng Q., Wang Y., & Sha Z. Quantitative analysis of pore structure and permeability characteristics of sandstone using SEM and CT images. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 88: 103861. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103861>. – EDN: KQRNME.
21. Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P. Chapter 14. Polyurethane grouting technologies. In: Zafar F., Sharmin E. (eds.) *Polyurethane*. IntechOpen. 2012: 307–336. <https://doi.org/10.5772/35791>
22. Zelivyanskaya O. *Petrophysics: textbook*; SKFY Publishing House: Stavropol, Russia; 2015 (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

Tatiana V. Shilova – Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation, shilovatanya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5056-9279>

Oksana A. Ivanova – researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation, ksu_88@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9334-4173>

Aleksander S. Serdyukov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation, aleksanderserdyukov@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS:

Tatiana V. Shilova – determination of the research goal and objectives; development of the methodology; conducting the experimental research; preparation of the original text; final conclusions.

Oksana A. Ivanova – literature review; conducting the experimental part of the study; processing the results; final conclusions.

Aleksander S. Serdyukov – processing of the results; graphical and tabular design of the results; revision of the text.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 02.04.2026; accepted for publication 08.04.2026.

Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами

Татьяна Викторовна Шилова* , Оксана Александровна Иванова , Александр Сергеевич Сердюков 

Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В сложных геотехнических условиях при строительстве, эксплуатации инженерных объектов используют укрепление несвязных грунтов полиуретановыми составами. Анализ современных исследований показал, что влияние полимеров на фильтрационные свойства песчаного грунта изучено недостаточно. Целью работы является определение особенностей изменения проницаемости и микроструктуры химически укрепленного песка в зависимости от способа обработки, расхода полиуретановых смол и внешних сжимающих нагрузок. **Методы и материалы.** Эксперименты проводили с мелкими, среднезернистыми песками. Для укрепления использовали двухкомпонентную высокоэластичную и однокомпонентную полиуретановые смолы, основное назначение которых – усиление грунтов, гидроизоляция, формирование противофильтрационных завес. Влияние составов на проницаемость и микроструктуру породы оценивали по результатам экспериментов, которые включали формирование смесей полимер-песок способами однорастворной и двухрастворной обработки смолами при объемном соотношении жидкий состав/порода – 0,05–0,25, исследование микроструктуры, проведение фильтрационных тестов при различных условиях нагружения образцов. **Результаты и обсуждение.** Определены особенности изменения проницаемости песка в зависимости от способа укрепления полиуретанами. В случае однорастворной обработки высокоэластичной смолой при объемном соотношении состав/порода – 0,2, проницаемость образцов составляет $7-13 \cdot 10^{-3}$ мкм². Двукратное уменьшение содержания смолы приводит к повышению проницаемости на 1–2 порядка, поскольку в структуре преобладают открытые межзерновые пустоты, формирующие связанные поровые каналы. Добавка малого объема однокомпонентного жесткого полиуретанового состава снижает проницаемость песка в 1,5 – 3,2 раза и повышает устойчивость образцов в условиях сжимающих нагрузок. **Заключение.** Практическая значимость результатов состоит в повышении эффективности использования полиуретановых смол для задач снижения фильтрационных свойств песков. Выбор способа химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи обеспечит как эффективное снижение проницаемости пород, так и уменьшение расхода дорогостоящих полимерных составов при возведении противофильтрационных завес и экранов в массиве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: песок, полиуретановые составы, проницаемость, химическое укрепление, геоматериал, микроструктура, сжимающая нагрузка, способ обработки

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шилова Т.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin

Tatiana V. Shilova* , Oksana A. Ivanova , Aleksander S. Serdyukov 

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: shilovatanya@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In complex geotechnical conditions during construction and operation of engineering structures, polyurethane compositions are used to strengthen loose soils. Analysis of current research has shown that the effect of polymers on sandy soil filtration properties is poorly studied. The purpose of this study is to determine the dependence of permeability and microstructure of chemically strengthened sand on the treatment method, polyurethane resin consumption and external compressive loads.

Methods and Materials. Experiments are carried out with fine and medium-grained sands. Two-component highly elastic and one-component polyurethane resins are used for strengthening. Their main purposes are soil stabilization, waterproofing, and formation of cutoff curtains. The effect of the resins on rock permeability and microstructure is assessed based on the experimental results. The experiments include formation of the polymer-sand mixtures using one-solution and two-solution resin treatments with resin/rock volume ratios of 0.05–0.25, microstructure study and filtration tests under various sample loading conditions. **Results and**

discussion. The dependence of the sand permeability on the method of strengthening with polyurethanes has been determined. In the case of one-solution treatment with highly elastic resin with composition/rock volume ratio of 0.2, the permeability of the samples is $7\text{--}13 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. A two-fold decrease of the resin content causes an increase in permeability by 1–2 orders of magnitude. Such behavior is explained by the structure in which open intergranular pores predominate and form connected pore channels. The addition of a small volume of a one-component rigid polyurethane composition reduces sand permeability by 1.5–3.2 times and improves the stability of samples under compressive loads. **Conclusion.** The practical significance of the results consists in the increasing efficiency of sand filtration properties reduction with polyurethane resins strengthening. The proper choice of a chemical treatment method with consider of the geotechnical problem provides both effective rock permeability reduction and decrease in the consumption of expensive polymer compositions for the construction of cutoff curtains and screens in the rock mass.

KEYWORDS: sand, polyurethane compositions, permeability, chemical strengthening, geomaterial, microstructure, compressive load, treatment method

ACKNOWLEDGEMENTS: Financial support for this work was provided by the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region, Russia under the grant No. 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/>.

FOR CITATION:

Shilova T.V., Ivanova O.A., Serdyukov A.S. Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin. *Nanotechnology in Construction*. 2026;18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объемов строительства, возведение и эксплуатация инженерных объектов осложняются опасными экзогенными процессами, среди которых распространены подтопление, просадочные, эрозийные явления, связанные с подземными водами [1, 2]. Рыхлая структура, высокая проницаемость песчаных грунтов становятся причиной проявления таких негативных процессов, как интенсивная фильтрация флюидов, разжижение, просадочность. В сложных геотехнических условиях применяют методы физико-химического воздействия с целью улучшения эксплуатационных свойств грунтов. Часто используют способы укрепления рыхлых и нарушенных химическими реагентами пород, взаимодействующими между собой и/или с подземными водами,

среди которых широко распространены полимерные составы [3–6]. В отличие от традиционных армирующих композиций (цементов, силиката натрия), полимерные смолы хорошо «просачиваются» в горные породы, армируя их в процессе отверждения. Двухкомпонентные высокоэластичные полиуретаны – распространенный тип полимеров, применяемых в строительстве для связывания рыхлых грунтов, возведения противofiltrационных завес, непроницаемых экранов в породном массиве [7–9]. В них взаимодействие изоцианата (компонента Б) и полиэфирного соединения (компонента А) – смеси полифункциональных гидроксилсодержащих полиолов с пенообразователем и катализатором – приводит к образованию вспененного полиуретана и значительному увеличению объема композиции. Частицы рыхлого грунта связываются отвержденной смолой,

приобретая малую остаточную пористость [10–13]. Применение вспенивающихся составов обеспечивает низкие фильтрационные свойства песчаных грунтов после химического укрепления. По данным [14], проницаемость мелкозернистых песков, пропитанных полиуретанами, составляет 10^{-4} – 10^{-3} мкм², что соответствует малопроницаемым и практически непроницаемым горным породам. Анализ современных исследований показал, что влияние расхода, способа обработки полимерными составами, сжимающих нагрузок на фильтрационные свойства рыхлых грунтов недостаточно изучено. Вместе с тем большой объем лабораторных тестов по укреплению пород и определению их свойств позволит прогнозировать результаты планируемых полевых работ. Целью исследования является определение особенностей изменения проницаемости и микроструктуры химически укрепленного песка в зависимости от способа обработки породы, расхода полиуретановых составов и внешних сжимающих нагрузок.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Материалы

Лабораторные эксперименты проводили с рыхлой породы, мелкими и среднезернистыми песками, отобранными на действующем карьере, расположенном в Новосибирском районе Новосибирской области. Предварительная подготовка экспериментальных образцов включала сушку до постоянной массы, ситовой рассев, определение гранулометрического состава породы. Песчаная фракция с размером зерен 0,2–0,3 мм составила около 80 масс. %, что соответствует мелкому и среднезернистому песку, согласно классификации по ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация» [15]. Доли крупной (более 0,5 мм) и мелкой (менее 0,2 мм) фракций получились около 7 и 12 масс. %, соответственно. Для дальнейших экспериментальных исследований использовали

выделенную фракцию 0,2–0,3 мм. В лабораторных условиях были определены абсолютная и объемная плотность песка, значения которых составили 2,65 г/см³ и 1,6 г/см³. Далее оценивали коэффициент пористости неукрепленной рыхлой породы, среднее расчетное значение – 0,65. Эксперименты проводили с маловлажным песком со степенью водонасыщения около 0,1 д. е. (дольные единицы). В лабораторных условиях образцы искусственно увлажняли путем добавления воды до необходимой влажности.

С целью связывания и химического укрепления песка использовали двухкомпонентную высокоэластичную полиуретановую смолу (далее состав МС), которая предназначена для консолидации и гидроизоляции рыхлых пород, создания непроницаемых экранов в массивах, в строительстве – для ремонта трещин в подземных структурах (переходы, тоннели, основания), создания противофильтрационных завес на контакте грунт–бетон. Состав МС образуется путем смешивания отдельных жидких компонентов А и В в объемном соотношении 1:1 до однородной консистенции. Компонент А представляет собой смесь касторового масла, феноксипропанола и низкомолекулярного полипропиленгликоля, катализатора. Компонент В является смесью метилендифенилдиизоцианата, полипропиленгликоля, пропиленкарбоната. Низкая вязкость, длительное время реакции (около 3,5 часов), медленное вспенивание состава МС способствует проникновению в мелкие пустоты, поровые каналы породы, что приводит к существенному снижению проницаемости укрепленного песка. Отвержденная полиуретановая смола представляет собой эластичный, непроницаемый материал, ее основные характеристики приведены в таблице 1 [16].

В экспериментах для химического укрепления песка также использовали однокомпонентную быстросхватывающую полиуретановую смолу (далее состав БС), которая предназначена как для связывания рыхлых и неустойчивых горных пород при возведении подземных сооружений, так и для снижения

Таблица 1. Свойства двух- и однокомпонентных полиуретановых составов [16]

Параметры	Состав МС	Состав БС
Назначение	Укрепление рыхлых грунтов, гидроизоляция, формирование непроницаемых завес	Укрепление рыхлых и неустойчивых пород, формирование противофильтрационных завес
Объемное отношение компонентов А и Б	1:1	–
Объемное отношение смола:вода	–	1:1 – 9:1
Плотность (компоненты А / Б), г/см ³	1,01/1,21 при 23 °С	1,14 при 20 °С
Вязкость (компоненты А/Б/смесь), мПа·с	115/40/80 при 23 °С	800–1000 при 20 °С
Время отверждения, с	≈10 800	90–180

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

проницаемости грунтов, формирования противофильтрационных завес в массиве за строительными конструкциями. Реакция полимеризации состава БС происходит при его взаимодействии с водой. В случае соотношения жидкая смола/вода от 1:1 до 9:1 время полного отверждения составляет 90–180 секунд (табл. 1). В процессе реакции полимеризации происходит интенсивное вспенивание за счет выделения углекислого газа, который является продуктом взаимодействия изоцианата и воды. В экспериментах использовали объемное соотношение жидкая смола/вода, равное 5:1. После полного отверждения состава БС образуется мелкопористая пена, стабильная при значительных нагрузках. Ранее было установлено, что добавление малого объема быстродействующего однокомпонентного полиуретанового состава БС повышает прочностные характеристики песка в 1,3–3 раза, по сравнению с образцами, укрепленным лишь высокоэластичной смолой [16]. Однако резкое увеличение вязкости композиции в процессе полимеризации может уменьшать зону воздействия в укрепляемом грунте, особенно в низкопроницаемых и содержащих тонкие трещины породах. В данной работе экспериментальным путем предстоит выяснить влияние добавки быстродействующей однокомпонентной смолы на приобретенные фильтрационные свойства химически укрепленного песка.

Методы

Влияние полиуретановых составов на проницаемость песка определяли по результатам лабораторных исследований. Экспериментально включали:

подготовку образцов породы, обработку полимерными составами, формирование образцов укрепленного песка (далее геоматериалы), исследование микроструктуры, выполнение фильтрационных тестов. В экспериментах использовали два способа «связывания» песка смолами: однорастворный и двухрастворный. Однорастворный способ состоит в смешивании образца породы с готовым жидким полимерным составом МС или БС. Перемешивание проводили до получения однородной массы. Для обоих типов полиуретановых композиций геоматериалы формировали при соотношении жидкая смола/порода – 0,05; 0,1; 0,2 (рис. 1). Двухрастворный метод заключался в последовательном добавлении и смешивании готовых составов МС и БС с песком. Образцы геоматериалов формировали при соотношениях жидких составов МС/порода и БС/порода, равных 0,05–0,2 и 0,05, соответственно (рис. 2).

В обоих случаях полученные смеси песка с полиуретановыми смолами размещали в разъемных пластиковых цилиндрических формах, высотой 80 мм и диаметром 30 мм, выдерживали до полного отверждения полимеров, вынимали и обрезали до 60 мм. Сформированные образцы использовали для дальнейших фильтрационных тестов.

Проницаемость различных геоматериалов определяли на основе фильтрационных экспериментов. Тесты проводили на лабораторной установке, разработанной в Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук и предназначенной для измерения проницаемости горных пород, пористых материалов в условиях стационарного линейного течения газа



Рис. 1. Однорастворный способ обработки песка полиуретановыми смолами: 1 – подготовка образца рыхлой породы (песка); 2 – подготовка полимерного состава МС (или состава БС); 3 – смешивание жидкого раствора с образцом рыхлой породы в соотношении 0,05, 0,1, 0,2; 4 – размещение смеси в цилиндрических формах диаметром 30 мм и высотой 80 мм, выдерживание до полного отверждения полимеров, извлечение образцов геоматериалов; 5 – подготовка геоматериалов для фильтрационных тестов: уменьшение высоты образцов до 60 мм

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



Рис. 2. Двухрастворный способ обработки песка полиуретановыми смолами: 1 – подготовка образца рыхлой породы; 2 – подготовка состава МС; 3 – смешивание жидкого состава МС с образцом рыхлой породы в соотношении 0,05; 0,1; 0,2; 4 – подготовка состава БС; 5 – добавление состава БС (объемное соотношение жидкая смола/порода равно 0.05) к смеси песка с составом МС; 6 – размещение смеси в цилиндрических формах диаметром 30 мм и высотой 80 мм, выдерживание до полного отверждения полимеров, извлечение образцов геоматериалов; 7 – подготовка геоматериалов для фильтрационных тестов: уменьшение высоты образцов до 60 мм

при осевом и боковом давлениях сжатия цилиндрических образцов. Схема установки, методика проведения экспериментов и определения проницаемости представлены в работах [17, 18]. Тесты проводили с образцами геоматериалов диаметром 30 мм и высотой 60 мм в условиях давления всестороннего сжатия 400, 600, 800 кПа (рис. 3). Коэффици-

енты проницаемости рассчитывали, используя выражение [17, 18]:

$$k = \frac{2 \times 10^4 V_{\mu} L P_{at}}{St \Delta P (\Delta P + 2P_{at})}, \quad (1)$$

где k – расчетный коэффициент проницаемости, мД (миллидарси, 1 мД = $10^{-3} \cdot \text{мкм}^2$);



Рис. 3. Геоматериалы для фильтрационных экспериментов: 1 – цилиндрический образец геоматериала; 2, 3 – боковое и осевое сжатие образцов внешним давлением; 4 – направление фильтрации газа

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

μ — вязкость, мПа·с;

S — площадь поперечного сечения образца, см²;

ΔP — перепад давления на концах образца, 10⁻¹·МПа;

$P_{ат}$ — давление на выходе из образца (атмосферное), 10⁻¹·МПа;

L — длина образца, см;

t — время фильтрации, с;

V — объем газа, прошедшего через образец, см³.

Микроструктуру химически укрепленного песка исследовали методом электронной сканирующей микроскопии (далее SEM). SEM — изображения использовали с целью изучения распределения неоднородностей и пустот, оценки содержания отвержденных полимеров в полученных геоматериалах, определения линейных размеров пор и пр. Анализ и статистическую обработку данных выполняли с помощью автоматизированного анализатора микроструктуры твердых материалов «Mineral C7» (компания SIAMS), применяя специализированное программное обеспечение: модуль «Исследование пористости», «Изучение структуры пор» [19, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение отвержденных полиуретановых составов в пустотном пространстве песков, заполнение и характеристики пор оценивали, исследуя микроструктуру геоматериалов по SEM — изображениям. В случае использования однорастворного способа обработки песка составом МС при соотношении жидкая смола/порода — 0,2, консолидированный песок приобретает базальную структуру, для которой характерно распределение зерен в основной массе связующего вещества (отвержденного полимера). Заполненность пустотного пространства отвержденным полимером составляет 54–58% (рис. 4, 5). После укрепления песка смолой пористость уменьшается более чем в 5 раз, по сравнению с неармированной породой. Для геоматериалов характерно наличие мелких замкнутых пустот в агрегатах отвержденного полимера размером сотни нанометров — несколько микрометров и небольшое количество более крупных межзерновых пор, диаметр которых в среднем составляет 16,5 мкм. При двух- и четырехкратном уменьшении объема жидкого состава МС, до соотношений жидкий состав МС/порода, равных 0,1 и 0,05, содержание отвержденного полимера снижается до 30–45% или в среднем в 1,3–1,6 раза (рис. 4, 5). Микроструктуру полученных геоматериалов можно описать как контактную, согласно классификации, представленной в работе [21]. Отвержденный состав МС представляет собой вещество, сосредоточенное на границах песчаных зерен, соединяющее их единой связующей полимерной «матрицей». Размер

таких связующих агрегатов — 10–20 мкм (рис. 4). В структуре геоматериалов преобладают межзерновые поры, диаметр которых в среднем составляет 18,3 и 20,5 мкм для образцов, сформированных при соотношениях жидкий состав МС/порода — 0,1 и 0,05, соответственно. Зависимость содержания отвержденного полимера МС в пустотном объеме геоматериалов от соотношения состав МС/порода описывается линейной аппроксимацией с высоким коэффициентом детерминации $R_2 = 0,85$.

В случае укрепления песка однорастворным способом составом БС при соотношении жидкая смола/порода — 0,2, заполненность порового пространства отвержденным полимером составляет 48–54% (рис. 4, 5). Для геоматериалов характерно наличие как мелких замкнутых пустот в агрегатах отвержденного полимера, так и значительного количества более крупных межзерновых пор со средним диаметром 12 мкм. Снижение объема жидкого полиуретанового состава БС до соотношений жидкая смола/порода 0,1, 0,05 приводит к уменьшению содержания отвержденного полимера в образцах до 25–45% или в 1,2–1,9 раза (рис. 5). Полученные геоматериалы обретают контактную структуру, как и в случае укрепления песка низковязким составом МС. Размер связующих полимерных агрегатов составляет 12–16 мкм (рис. 4). В образцах преобладают межзерновые поры со средним диаметром 13,5 и 17 мкм для геоматериалов, сформированных при соотношениях жидкий состав БС / порода — 0,1 и 0,05, соответственно. Линейная аппроксимация зависимости содержания отвержденного полимера БС в пустотном объеме геоматериалов от соотношения жидкий состав БС/порода имеет коэффициент детерминации $R_2 = 0,8$ (рис. 5).

Особенности структуры пород, укрепленных двухрастворным способом, схожи с характеристиками геоматериалов, полученных при однорастворном способе обработки низковязким составом МС. При использовании 20 об. % состава МС и добавки смолы БС — 5 об. %, заполненность пустотного пространства отвержденным полимером составляет 53–62%, образцы имеют базальную структуру с преобладанием мелких закрытых пор в полимерных агрегатах диаметром сотни нанометров — несколько микрометров. По мере снижения суммарного объема жидких композиций до 10 об. %, уменьшается содержание отвержденных полимеров, увеличиваются количество и размеры межзерновых пор, геоматериалы приобретают контактную структуру.

Экспериментальные исследования показали, что при объемных суммарных соотношениях жидких составов МС, БС к породе, не превышающих 0,15, в структуре укрепленного песка образуется значительное количество открытых межзерновых пустот, размер которых увеличивается по мере уменьшения

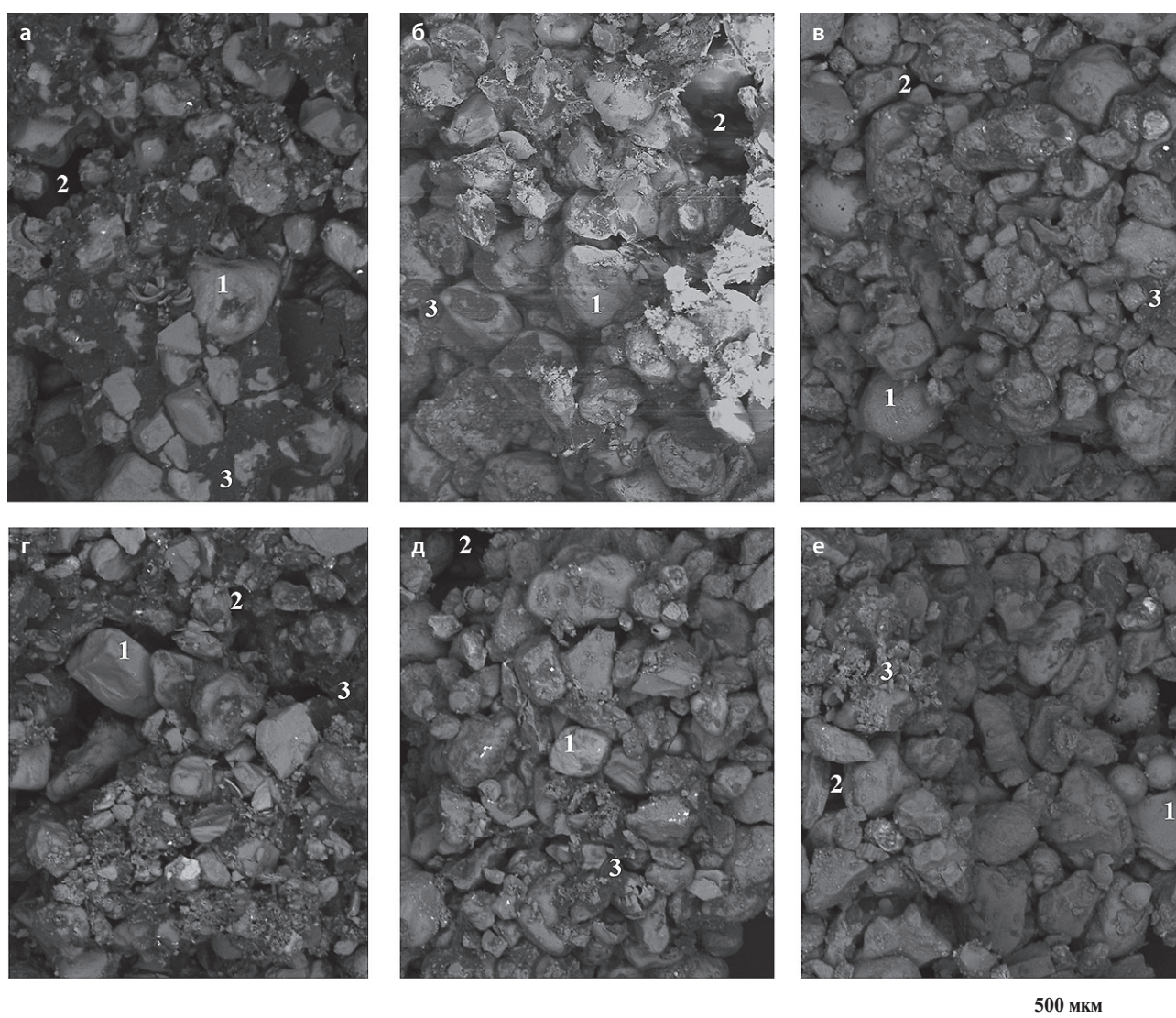


Рис. 4. SEM – изображения химически укрепленного песка, полученные при обработке породы однорастворным способом полиуретановыми составами МС и БС. Соотношение жидкого состава МС с породой: а – 0,2; б – 0,1; в – 0,05. Соотношение жидкого состава БС с породой: г – 0,2; д – 0,1; е – 0,05. Обозначения: 1 – песчаные зерна; 2 – межзерновые пустоты; 3 – отвержденные полимеры

содержания смол. Такие пустоты могут формировать связанные поровые каналы в образцах, существенно влияя на фильтрацию жидкостей, газов и проницаемость полученных геоматериалов.

По результатам лабораторных экспериментов определены коэффициенты проницаемости геоматериалов, которые были сформированы при различных методах химического укрепления песка, типах и объемных расходах полиуретановых смол. В случае использования способа однорастворной обработки песка полимерным составом БС при объемном соотношении жидкая смола БС/порода – 0,2, проницаемость геоматериалов составляет 15 – 20 мД (рис. 6). Образцы химически укрепленного песка стабильны

при сжимающих нагрузках 400–800 кПа, значения коэффициентов проницаемости практически не изменяются. Это связано со свойствами отвержденного однокомпонентного состава БС, который представляет собой жесткий вспененный материал, стабильный при значительных нагрузках.

В случае способа однорастворной обработки песка при объемном соотношении жидкий состав МС/порода, равном 0,2, значения коэффициента проницаемости образцов составили 7–13 мД. Установлено, что фильтрационная способность геоматериалов снижается примерно в 1,5 раза, по мере увеличения давления всестороннего сжатия от 400 до 800 кПа (рис. 6). Это объясняется высоким содержанием вы-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

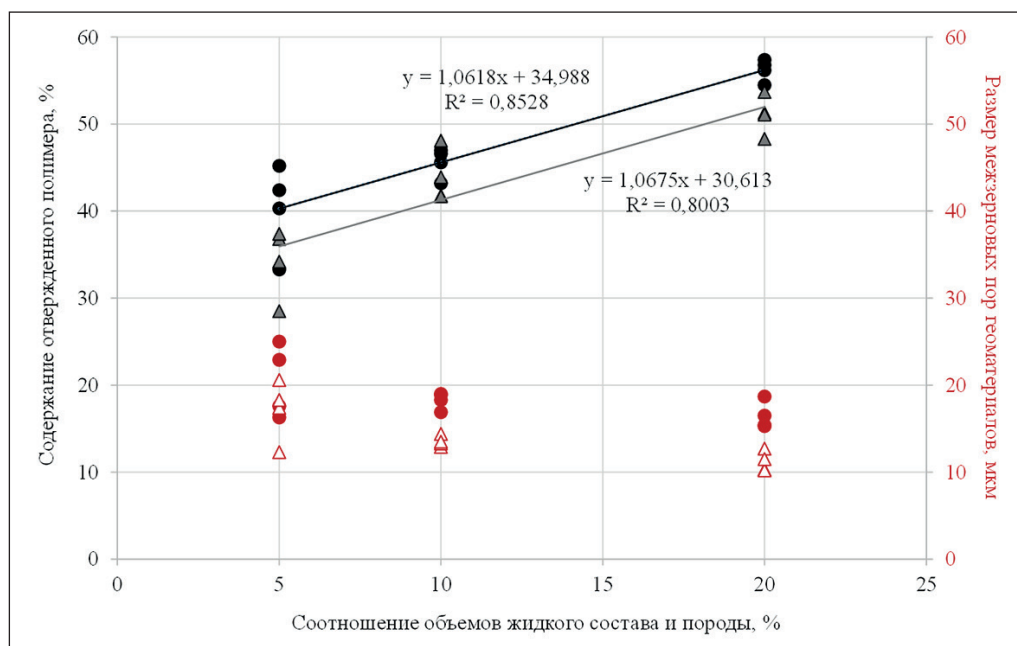


Рис. 5. Зависимость содержания отвержденных полимеров МС, БС в пустотном объеме и размера межзерновых пор от объемного соотношения жидкий состав/порода по данным анализа SEM - изображений. Черные и красные круги – экспериментальные данные исследования геоматериалов (содержание отвержденного полимера и размер пор, соответственно), полученных при одностороннем способе обработки песка составом МС. Серые и белые треугольники – данные исследования геоматериалов (содержание отвержденного полимера и размер пор), полученных при одностороннем способе обработки породы составом БС. Черная и серая линии – линейные аппроксимации результатов экспериментов

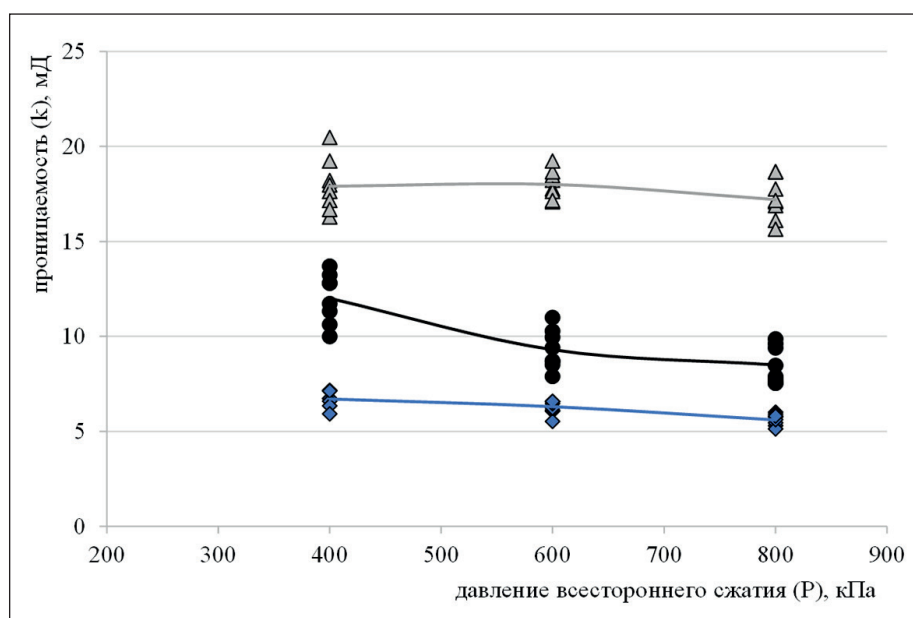


Рис. 6. Зависимость проницаемости геоматериалов (k), полученных при одностороннем и двухстороннем способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия (P). Экспериментальные данные исследования образцов, полученных при одностороннем способе обработки при соотношении жидкий состав/порода – 0,2: черные круги – укрепление составом МС, серые треугольники – укрепление составом БС. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухстороннем способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,2 и 0,05, соответственно. Сплошные линии – кривые, построенные по средним значениям коэффициентов проницаемости

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

сокоэластичного материала в образцах (54–58%) – отвержденного полимерного состава МС, который деформируется при низких сжимающих нагрузках, приводя к уменьшению пустотного объема в структуре. Дополнительная добавка 5 об. % жидкой смолы БС и применение двухрастворного способа обработки приводят снижению проницаемости в 1,5–1,8 раза и повышению устойчивости образцов при сжимающих напряжениях. Возможной причиной является формирование упрочняющего полимерного «каркаса» в структуре породы из отвержденного состава БС, который связывает песчаные зерна.

Однокомпонентный способ обработки и снижение расхода состава МС до объемного соотношения жидкая смола МС/песок – 0,1 приводит к увеличению коэффициента проницаемости на 1–2 порядка, до значений 500–700 мД. Полученные геоматериалы менее чувствительны к воздействию сжимающей нагрузки, и проницаемость сохраняется при двухкратном увеличении давления всестороннего сжатия (рис. 7). Это связано со снижением содержания высокоэластичного деформируемого материала (отверженной смолы МС) до 30–45% в консолидированных песках. Добавка 5 об. % жидкого состава БС и использование двухрастворного способа обработки породы приводит к значительному снижению фильтрационной способности геоматериалов. Коэффи-

циенты проницаемости уменьшаются в 2,9–3,2 раза (рис. 7). Полученные геоматериалы стабильны при давлениях всестороннего сжатия 400–800 кПа.

Дальнейшее двухкратное уменьшение содержания полиуретанового состава МС, до объемного соотношения жидкая смола/порода – 0,05, незначительно влияет на фильтрационные свойства химически укрепленного песка. Значения проницаемости геоматериалов, полученных при однорастворном способе обработки, достигают 520–700 мД (рис. 8). Дополнительная добавка 5 об. % жидкого состава БС и использование двухрастворного способа обработки снижает проницаемость образцов в 1,3–1,5 раза. Геоматериалы стабильны в условиях сжимающих нагрузок 400–800 кПа.

Полученные коэффициенты проницаемости химически укрепленного песка сравнивали с типовыми значениями, характерными для разных классов грунтов и представленными в работе [22]. Установлено, что при объемном соотношении жидкий полимерный состав/порода 0.2 и более, независимо от типа полимера и способа обработки, геоматериалы приобретают проницаемость, свойственную слабопроницаемым и полупроницаемым породам: песчаные глины, очень слаботрешиноватые породы, суглинки (табл. 2). Низкая фильтрационная способность может быть связана с преобладанием в структуре

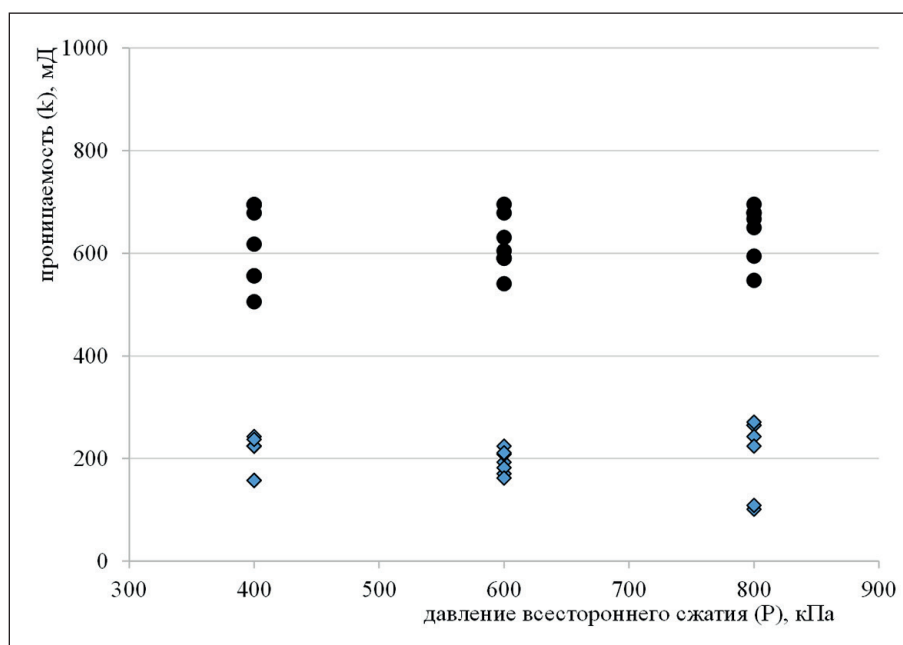


Рис. 7. Зависимость проницаемости геоматериалов (к), полученных при однорастворном и двухрастворном способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия (Р). Черные круги – экспериментальные данные исследования образцов, полученных при однорастворном способе обработки при соотношении жидкий состав МС/порода – 0,1. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухрастворном способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,1 и 0,05, соответственно

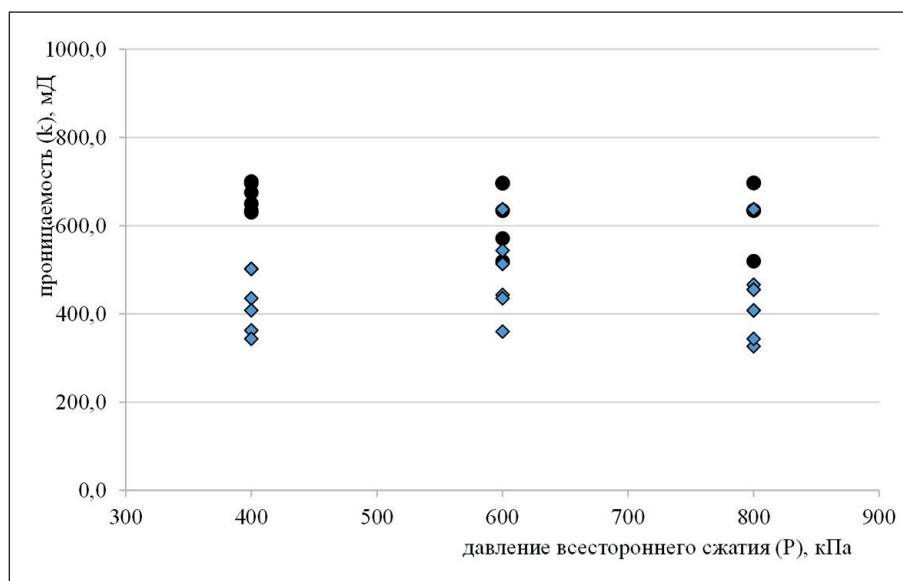


Рис. 8. Зависимость проницаемости геоматериалов (k), полученных при однорастворном и двухрастворном способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия (P). Черные круги – экспериментальные данные исследования образцов, полученных при однорастворном способе обработки при соотношении жидкий состав МС/порода – 0,05. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухрастворном способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,05 и 0,05, соответственно

Таблица 2. Проницаемость химически укрепленного песка при различных способах обработки, объемном расходе полимера, давлениях всестороннего сжатия

Способ обработки песка полимерными смолами	Содержание составов, об. % (состав МС; состав БС)	Среднее значение коэффициента проницаемости укрепленного песка, k_{cp} (мД) при различных давлениях сжатия, P (кПа)		
		$P = 400$	$P = 600$	$P = 800$
Однорастворный	(20; 0)	12	9,3	8,5
Однорастворный	(10; 0)	614,7	618,6	644,3
Однорастворный	(5; 0)	665,2	635,5	636,0
Двухрастворный	(20; 5)	6,7	6,3	5,6
Двухрастворный	(10; 5)	205,0	198,2	202,4
Двухрастворный	(5; 5)	459,4	509,8	436,4

замкнутых пустот размером сотни нанометров – несколько микрометров, которые не образуют сплошные поровые каналы.

В случае объемного соотношения жидкий полимерный состав/порода – 0,05–0,15 полученным геоматериалам свойственна проницаемость, характерная для класса проницаемых пород [22]. Повышение фильтрационной способности химически укрепленных песков связано с увеличением количества и размера открытых межзерновых пор в структуре образцов, которые могут формировать сплошные поровые каналы, способствующие фильтрации флюидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ химического укрепления песка полиуретановыми составами, объемный расход смол существенно влияют на заполнение пустотного пространства отвержденным полимером, свойства остаточной пористости, проницаемость полученных геоматериалов. Выявлено, что в случае обработки песка двухкомпонентным высокоэластичным полиуретаном при объемном соотношении жидкая смола/порода не менее 0,2 образцы приобретает базальную структуру, для которой характерно распределение зерен в основной массе связующего

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

вещества – отвержденного полимера. В структуре преобладают мелкие замкнутые пустоты размером сотни нанометров – несколько микрометров. При объемных суммарных соотношениях жидких полиуретановых составов к породе, не превышающих 0,15, в структуре геоматериалов распространены открытые межзерновые поры, размер которых увеличивается по мере уменьшения содержания смол. Такие пустоты формируют связанные поровые каналы, существенно влияя на проницаемость химически укрепленных песков. По результатам экспериментов определены особенности изменения проницаемости геоматериалов в зависимости от способа армирования песка полиуретановыми смолами. Получено, что в случае способа однорастворной обработки песка при объемном соотношении двухкомпонентная высокоэластичная смола/порода, равном 0,2, значения коэффициента проницаемости образцов составляют 7–13 мД и снижаются примерно в 1,5 раза по мере увеличения сжимающей нагрузки от 400 до 800 кПа. Это связано с высоким содержанием высокоэластичного материала, который деформируется при сжатии, приводя к уменьшению пустотного объема в структуре. Дополнительная добавка 5 об. % жесткой однокомпонентной смолы и применение двухрастворного способа обработки приводят к снижению проницаемости в 1,5–1,8 раза, повышению устойчивости образцов при аналогичных сжимающих напряжениях. Установлено, что использование однорастворного способа укрепления и двухкратное снижение расхода высокоэластичной смолы приводят к увеличе-

нию коэффициента проницаемости на 1–2 порядка, до значений 500–700 мД. Добавка 5 об. % жидкого однокомпонентного полиуретанового состава вызывает снижение проницаемости в 2,9–3,2 раза. Полученные геоматериалы устойчивы при давлениях всестороннего сжатия 400–800 кПа. Дальнейшее двухкратное уменьшение содержания полиуретановых смол до объемного соотношения жидкая смола/порода – 0.05 незначительно влияет на фильтрационные свойства химически укрепленного песка. Сравнение полученных коэффициентов проницаемости геоматериалов с типовыми значениями показало, что при объемном соотношении жидкий полимерный состав/порода, равном 0,2 и более, образцы имеют проницаемость, свойственную породам класса слабопроницаемых и полупроницаемых: песчаные глины, очень слаботрещиноватые породы, суглинки. Практическая значимость результатов заключается в повышении эффективности использования полиуретановых смол для задач снижения фильтрационных свойств несвязных грунтов. Выявленные зависимости проницаемости геоматериалов от свойств песка, способа обработки, объемных соотношений жидких смол и породы, условий нагружения образцов указывают на необходимость выбора оптимального способа химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи. Это обеспечит как эффективное снижение фильтрационных свойств несвязных грунтов, так и уменьшение расхода дорогостоящих полимерных составов при возведении противофильтрационных завес и экранов в массиве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонова А.В. *Основы гидрогеологии и инженерной геологии: учебное пособие*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 149.
2. Нуднер В.А и др. *Гидрогеология СССР. Том 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская область, Омская область, Новосибирская область, Томская область)*. Москва: Недра; 1970. 368.
3. Zuber S.S., Kamarudin H., Abdullah M.M.A.B., Binhussain M. Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013;7(5):258–265.
4. Firoozi A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A., Baghini M.S. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*. 2017;8(1):1–26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>. – EDN: MIK1BR.
5. Chang I., Prasadhi A. K., Im J., Cho G. C. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*. 2015;77:430–438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.116>
6. Ma S., Ma M., Huang Z., Hu Y., Shao Y. Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating. *Soils and Foundations*. 2023;63(3):1–17. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101299>. – EDN: ZYNOLW.
7. Saleh S., Yunus N.Z.M., Ahmad K., Ali N. Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review. *Construction and Building Materials*. 2019;202:738–752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.048>. – EDN: AKAMDJ.
8. Anagnostopoulos C.A., Aggelidis V. Factors affecting properties of polymer grouted sands. *CivilEng*. 2024; 5(1): 65–88. <https://doi.org/10.3390/civileng5010004>. – EDN: WLWBSQ.
9. Guo C., Sun B., Hu D., Wang F., Shi M., Li X. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019;56(3):171–177. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09586-7>. – EDN: YINLRB.

10. De Souza F.M., Kahol P.K., Gupta R.K. Chapter 1. Introduction to polyurethane chemistry. In: *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*. Pittsburg: ASC Publications; 2021.
11. Komurlu E., Kesimal A. Experimental study of polyurethane foam reinforced soil used as a rock-like material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015;7(5):566-572. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.05.004>
12. Wang X., Zhang F., Wu J., Qiang S., Li B., Zhang G. Diffusion Behavior of Polyurethane Slurry for Simultaneous Enhancement of Reservoir Strength and Permeability Through Splitting Grouting Technology. *Polymers*. 2025;17(18):2513. <https://doi.org/10.3390/polym17182513>. – EDN: TFGPLJ.
13. Hao M., Zhang J., Zou L., Li X., Zhong Y., Cvetkovic V. Influence of component parameters on propagation characteristics of foaming polyurethane grout in rock fractures. *Construction and Building Materials*. 2024;428:136227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136227>. – EDN: XBECLE.
14. Шилова Т.В., Сердюк И.М., Сердюков С.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;1:26–32. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240103>. – EDN: IJESYJ.
15. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. Введ. 2021-01-01 М.: Стандартинформ, 2020. 38.
16. Шилова Т.В., Сердюков С.В., Дробчик А.Н. Экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств песчаного грунта при его укреплении полиуретановыми составами. *Горные науки и технологии*. 2025; 10(1): 15-24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>. – EDN: LMLQJK.
17. Serdyukov S.V., Shilova T.V., & Drobchik A.N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks. *Journal of mining science*. 2017;53(5):954-961. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052994/>. – EDN: YBVXJJ.
18. ГОСТ 26450.2-85 Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. Введ. 1986-07-01 М.: Издательство стандартов, 1985. 17.
19. Siams. Available online: <https://siams.com/minerals7/?ysclid=mhvlgl41qb576492978> (accessed on 27 October, 2025).
20. Ni H., Liu J., Huang B., Pu H., Meng Q., Wang Y., & Sha Z. Quantitative analysis of pore structure and permeability characteristics of sandstone using SEM and CT images. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 88: 103861. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103861>. – EDN: KQRNME.
21. Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P. Chapter 14. Polyurethane grouting technologies. In: Zafar F., Sharmin E. (eds.) *Polyurethane. IntechOpen*. 2012:307–336. <https://doi.org/10.5772/35791>
22. Зеливянская О.Е. *Петрофизика: учебное пособие*. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. 111.

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

Шилова Татьяна Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, shilovatanya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5056-9279>

Иванова Оксана Александровна – младший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, ksu_88@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9334-4173>

Сердюков Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, aleksanderserdyukov@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шилова Т.В. – постановка целей и задач исследования; развитие методологии; проведение экспериментальной части исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Иванова О.А. – литературный обзор; проведение экспериментальной части исследования; обработка результатов; итоговые выводы.

Сердюков А.С. – обработка результатов; графическое и табличное оформление результатов; доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 02.04.2026; принята к публикации 08.04.2026.

Original article

CC BY 4.0

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>

Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber

Oksana A. Larsen^{1*} , Dheyaa A. N. Alobaidi² , Svetlana V. Samchenko¹ 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

² Ministry of Education General Directorate of Al-Qadisiyah Education, Al Diwaniyah, 58001, Al-Diwaniya, Alsaray Street, 100, Iraq

* Corresponding author: e-mail: larsen.oksana@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Polymer fiber is widely used in the production of structural concrete components, in shotcrete for tunnels, concrete slabs, blast-resistant concrete, and solid road pavements. Recently, numerous studies have been devoted to the use of fibers derived from recycled polymers in fiber-reinforced concrete. Most of these studies address the effect of fiber on the compressive, flexural and tensile strength properties of concrete. Fibers of various lengths based on nylon, aramid, polyester, polyethylene terephthalate, polypropylene, polyvinyl alcohol, and polyvinyl chloride are used in concrete. However, the insufficient amount of data, or its complete absence, regarding the effect on the properties of concrete with polymer fibers based on recycled PVC necessitates further research, which is particularly relevant given the generation of significant volumes of PVC waste during the production of plastic windows. **Materials and methods.** The electron microscopy and thermomechanical analyses (TMA) were used to investigate the properties of PVC-based polymer fibers. The effect of the polymer fiber on properties of fine-grained concrete mixtures and hardened concrete, the standard testing methods were used, including the determination of workability by flow table test diameter on a vibrating plate, the average density of concrete mixtures and concrete, and tensile strength under flexural and compressive loading. **Results.** It is shown the positive effect of the grinding process determined by electron microscopy, which produces a rough surface and fibers of 2.5–4 cm in length, 1.75–4 mm in width, and 0.2–0.3 mm in thickness. It is established that the PVC-based fiber belongs to amorphous polymers of linear structure with a crystallization temperature of 86.4 °C and a destruction temperature of 208.91 °C. It is determined that the optimal fiber content in concrete does not impair the workability of concrete mixtures or affect their cohesion. It is shown that the addition of PVC-based fiber to fine-grained concrete in amount up to 1.2% increases the concrete density of 1.6 times, increases flexural tensile strength by 22%, and has no effect on compressive strength. **Conclusion.** Conducted studies confirm the feasibility of using polyvinyl chloride-based fiber as a component of fine-grained concretes. However, there is the lack of sufficient data of fiber introduction method in concrete which requires additional scientific research to prevent fiber clumping, establish its compatibility with chemical additives added to the concrete mixture and the effect of curing conditions.

KEYWORDS: Portland cement, fiber-reinforced concrete, fiber, recycled polyvinyl chloride, workability, strength

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Larsen O.A., Alobaidi D., Samchenko S.V. Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида

Оксана Александровна Ларсен^{1*} , Дия Абдулкадим Насер Альобаиди² , Светлана Васильевна Самченко¹ 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Российская Федерация

² Министерство образования, Главное управление образования в Аль-Кадисии, 58001, Аль-Дивания, улица Альсарай, д. 100, Ирак

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Широкое применение полимерная фибра получила при производстве конструктивных бетонных элементов, в торкрет-бетонировании туннелей, бетонных перекрытиях, взрывостойком бетоне и жестких дорожных покрытиях. Вопросам применения в дисперсно-армированных бетонах фибры на основе вторичной переработки полимеров в последнее время посвящено множество исследований. Большинство из них затрагивает влияние фибры на прочностные свойства бетона на сжатие, при изгибе и на растяжение. Применяются различные по длине волокна в бетонах на основе нейлона, арамида, полиэстера, полиэтилентерефталата, полипропилена, поливинилового спирта и поливинилхлорида. Однако недостаточное количество данных либо их полное отсутствие о влиянии на свойства бетона с полимерной фиброй на основе переработанного ПВХ вызывает необходимость дополнительных исследований, что особенно актуально ввиду образования значительных объемов отходов ПВХ при производстве пластиковых окон. **Материалы и методы.** В работе применены методы электронной микроскопии и термомеханического анализа для исследования свойств полимерной фибры на основе ПВХ. Для исследования влияния полимерной фибры на свойства мелкозернистых бетонных смесей и затвердевшего бетона применялись стандартные методы исследования, включающие определение диаметра расплыва на встраиваемом столике, среднюю плотность бетонных смесей и бетонов, прочность на растяжение при изгибе и при сжатии. **Результаты исследования.** Методом электронной микроскопии установлено положительное влияние процесса измельчения, позволяющего получить шероховатую поверхность и фибру с длиной 2,5–4 см, шириной 1,75–4 мм и толщиной 0,2–0,3 мм. Установлена принадлежность фибры на основе ПВХ к аморфным полимерам линейного строения с температурой стеклования 86,4 °С и температурой деструкции 208,91 °С. Установлено оптимальное содержание фибры, которое не ухудшает подвижность бетонных смесей и не нарушает их связность и удобообрабатываемость. Показано, что введение фибры на основе ПВХ в состав мелкозернистого бетона в количестве до 1,2% обеспечивает рост плотности бетона в 1,6 раз, повышение прочности при растяжении с изгибом на 22% и не оказывает влияния на прочность при сжатии. **Заключение.** Проведенные исследования подтвердили возможность применения фибры на основе поливинилхлорида в составе мелкозернистых бетонов. Однако недостаточное количество данных о порядке введения для предотвращения ее комкования, совместимости с химическими добавками, вводимыми в бетонную смесь, а также влияния условий твердения и дальнейшей области применения бетонов, в состав которых она входит, вызывает необходимость дальнейшего научного поиска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: портландцемент, дисперсно-армированный бетон, фибра, рециклинг поливинилхлорида, подвижность, прочность

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная работа выполнялась при финансировании Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ларсен О.А., Альобаиди Д., Самченко С.В. Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

INTRODUCTION

Enhancing concrete efficiency involves not only improving its mechanical and operational characteristics but also producing innovative composite materials, such as fiber-reinforced concretes [1]. The development of fiber-reinforced concrete compositions with enhanced strength, crack resistance, frost resistance, water permeability, as well as abrasion and impact resistance, represents the

most promising direction in the field of building materials science. Fibers of various origins exert a positive influence on concrete properties. Polymeric, glass, carbon, hybrid, and vegetable fibers of different shapes and sizes can be utilized as reinforcement. Currently, the use of steel fibers has become the most widespread, both domestically and internationally.

Polymeric fibers have gained widespread application in the production of structural concrete elements, shotcrete

for tunnels, concrete slabs, explosion-resistant concrete, and solid pavements [2]. In recent years, preference has been given to the use of secondary fibrous materials derived from industrial waste as reinforcing fibers. However, over 90% of polymers are still manufactured from virgin materials, with only a small fraction undergoing recycling [3, 4]. It is noted [5, 6] that only 32% of plastic waste is recycled, the rest is either incinerated (43%) or disposed in landfills (25%), causing significant environmental harm.

Plastic production has currently reached a massive scale, leading to a simultaneous surge in the volume of plastic-based waste. From 1950 to 2017, the total volume of plastic waste reached 8.3 billion tons. In 2021, annual production hit approximately 400 million tons, with only 9% being fully recycled and successfully reused. According to [5], global plastic production reached 413.8 million tons in 2023, of which only 8.9% was sent for recycling, and a mere 0.5% was actually utilized in the manufacturing of new products.

The service life of plastic products averages about 10 years, whereas their decomposition spans many decades, depending on composition and disposal methods [6].

In recent years, there has been a surge of interest in studying the impact of recycled polymeric fibers on the static and dynamic mechanical properties of concrete [7], fatigue characteristics [8, 9], and durability-related parameters. It has been found that incorporating recycled polymer fibers can reduce early-age concrete shrinkage, thereby enhancing mechanical properties and longevity [10]. Alongside polypropylene fibers, recycled polymer fibers effectively prevent crack propagation and increase freeze-thaw resistance [10]. Fiber-reinforced concrete (FRC) is widely utilized for airport pavements, highways, bridge decks, tunnel linings, and offshore platforms [11] — structures subjected to repetitive cyclic loading throughout their service life. Furthermore, polymeric fibers are effectively used in Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for repairing and strengthening bridge columns exposed to chloride-rich waters. The addition of fibers significantly minimizes crack formation and limits crack width resulting from shrinkage during hardening and subsequent curing, which also enhances the impact strength of the concrete.

Extensive experience exists in utilizing fibers derived from waste Polyethylene Terephthalate (PET) bottles, as well as polyethylene-based fibers and aggregates sourced from recycled low and high-density plastic bags. Furthermore, recycled Polyvinyl Chloride (PVC) has been employed as aggregates from pipe waste and as both aggregates and fibers from electrical cable insulation. Fiber obtained from recycled electrical cables is also used in concrete. Fibers of various lengths based on nylon [12], aramid [13], polyester [14], polyethylene terephthalate [15], polypropylene [16], polyvinyl alcohol [17], and polyvinyl chloride [18] are used.

There is established practice in using recycled PVC fibers in fiber-reinforced concrete with lengths ranging from 30 to 50 mm and diameters up to 4 mm. Research on the influence of recycled PVC fiber on the technological and mechanical properties of concrete mixtures revealed that incorporating 1% by mass of cement reduces the mixture's workability (slump) by 6.67% [21]. An increase in compressive, flexural, and tensile strengths was observed when fibers were added at dosages of 0.6%, 0.8%, and 1.0%. Specifically, it was established that an 0.8% fiber content leads to a 30.8% increase in compressive strength and a 9.11% increase in flexural strength. However, it was found that increasing the fiber content beyond 0.8% results in a decrease in concrete strength.

According to [22], the incorporation of recycled PVC fibers with a length of 40 mm and a thickness of 0.5 mm and a dosage of 0.5% by volume of the concrete contributes to increase in flexural tensile strength of 14.28%.

The recycling of PVC window profiles is a complex technological process. Thermal processing of PVC is accompanied by the release of hydrogen chloride (HCl), which necessitates strict safety protocols for personnel and specific conditions to ensure high-quality PVC regranulate. The profile recycling sequence includes pretreatment, mechanical shredding, sorting and fractionation, washing, and extrusion with melt filtration. There is only a limited number of studies have been conducted on the influence of recycled fibers derived from various polymers on concrete properties.

Numerous studies have recently focused on the application of recycled polymer fibers in fiber-reinforced concrete, mostly addressing their influence on compressive, flexural, and tensile strengths. However, there is no specific data of influence of recycled PVC-based fibers on concrete properties. This creates an urgent need for additional research, as a significant amount of PVC waste is generated during the production of plastic window profiles.

2. MATERIALS AND METHODS

In this work the following materials were used:

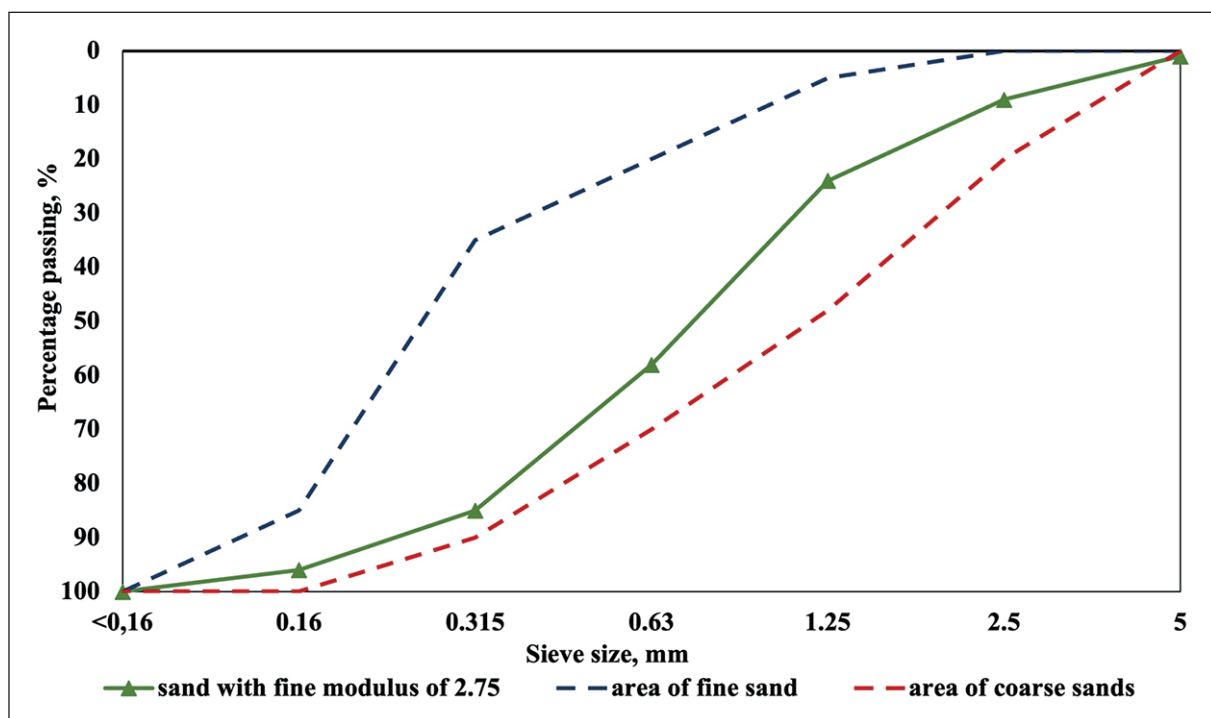
- Heidelberg Cement Rus manufactured Portland cement CEM I 52.5N in accordance with GOST 31108-2020, “General-purpose construction cements,” and used it as the binder. Its water demand was 30.2%, with an initial setting time of 150 min, a final setting time of 175 min, a specific surface area of 377.3 m²/kg, and a strength of 76 MPa at 28 days. The mineralogical and chemical composition of Heidelberg Cement Rus Portland cement CEM I 52.5N is presented in Table 1 and 2;
- quartz sand, Class I, with a Fineness modulus of 2.75, manufactured by “Bolars” with a true density of 2.65 g/cm³. Particle size distribution is shown in Fig. 1;

Table 1. Mineralogical composition of Portland cement CEM I 52.5N "HeidelbergCement Rus"

Component content, %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64	14	7	11

Table 2. Chemical composition of Portland cement CEM I 52.5N "HeidelbergCement Rus"

Component content, %											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
21.23	4.78	3.31	62.95	1.65	3.22	0.66	0.12	0.08	0.28	0.06	1.60

**Fig. 1.** Particle size distribution of fine aggregate

- recycled polyvinyl chloride (PVC) fiber was obtained by shredding of the window profile in a shredder machine, and it is shown in Fig. 2.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The technological scheme is presented in Fig. 3. The production of polymer fibers based on recycled waste from polyvinyl chloride (PVC) window profiles was carried out by shredding in a chipping machine and included the separation of the glass unit and rubber seals from the window profile (Fig. 4). In the case of recycling waste from the cutting and trimming of window frames, it is necessary to remove the protective film from the surface. Single-stage shredding of the profile in a chipping ma-

chine allows for obtaining polymer fibers with a rough surface, ranging from 2.5 to 4 cm in length, 1.75 to 4 mm in width, and 0.2 to 0.3 mm in thickness (Fig. 5).

The phase and relaxation states of PVC-based fiber properties, and deformations under mechanical and thermal loads, was conducted by using the equipment (Fig. 6). A TMA Q400 thermomechanical analyzer manufactured by TA Instruments was used to determine the glass transition and degradation temperatures, as well as to determine the linear thermal expansion coefficient (LTEC). The polymer fiber test specimen is presented in Fig. 7.

Thermomechanical properties of polymers generally characterize their mechanical behavior under varying temperatures [23]. Thermomechanical Analysis (TMA) is employed to identify the polymer's nature, crystallization,

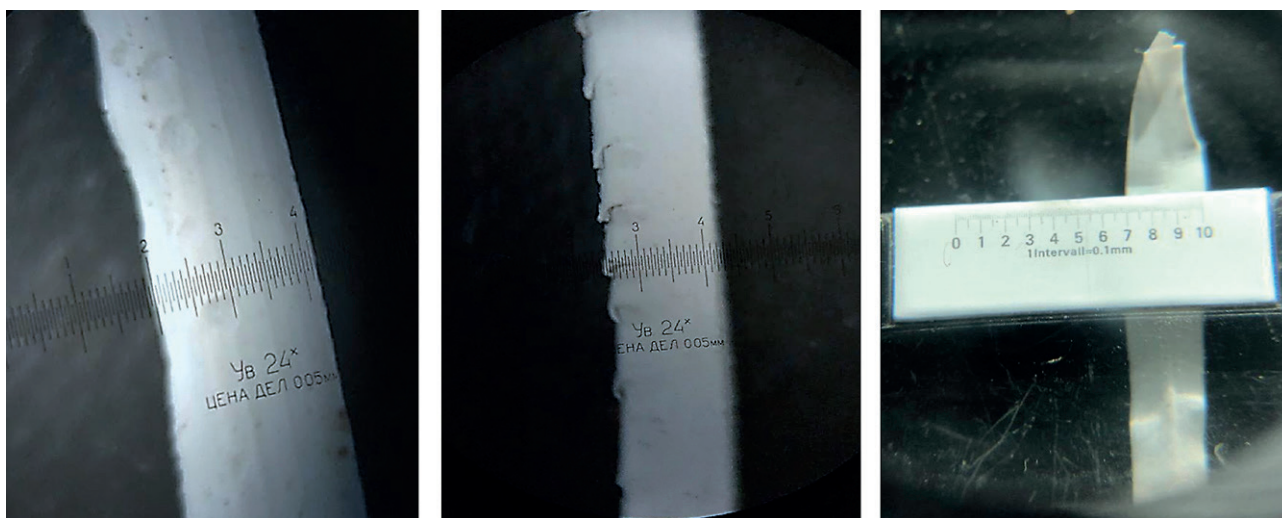


Fig. 2. Recycled polyvinyl chloride (PVC) fiber

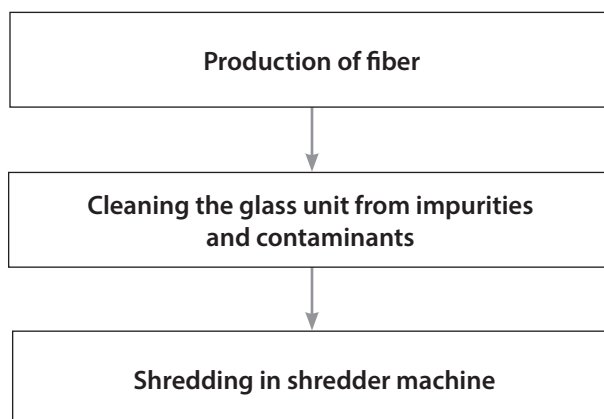


Fig. 3. Production of PVC fiber from window profile



Fig. 4. Fibre production in a shredder machine



Fig. 5. Equipment for measuring the geometric dimensions of fiber

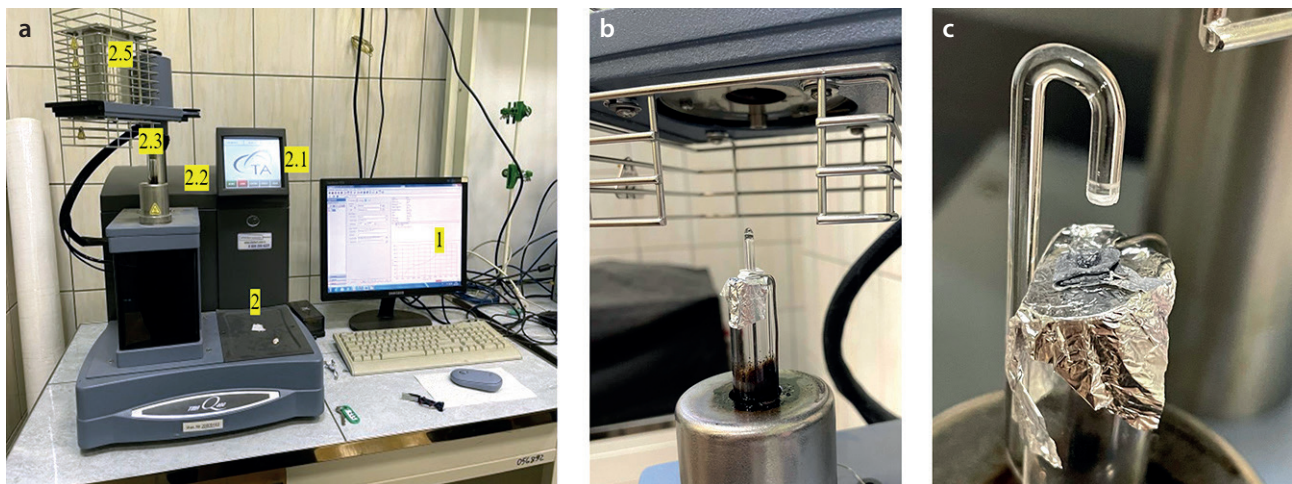


Fig. 6. Study of the thermomechanical properties of PVC-based fiber: a) 1 – Computer; 2 – TMA device: 2.1 – Display; 2.2 – Stage (Sample platform); 2.3 – Probe; 2.4 – Thermocouple; 2.5 – Furnace; b) Fiber specimen before testing; c) Specimen after testing

glass transition, and melting temperatures, as well as to evaluate its thermal operating ranges. Experimental results indicate that the obtained data are significantly influenced by testing conditions, the prior processing of the PVC profiles, and the applied mechanical and thermal loading regimes. For the thermomechanical curve plotting, a load of 1 N was applied to the specimen with a heating rate of 5 °C/min. The TMA data analysis (Fig. 7) confirmed that the PVC-based fiber is an amorphous polymer with a linear structure. The analysis of frea 1, during heating from 0 to 86.4 °C, corresponds to the glass transition temperature (T_g), indicating the polymer's glassy state and its linear amorphous nature. The area 2 corresponds to the high-elastic (rubbery) state, while the area 3 represents the viscous-flow state, leading to a degradation temperature (T_d) of 208.91 °C. The heating rate of 5 °C/min and a minimal load of 0.01 N to determine the linear thermal expansion coefficient were used. The thermomechanical

curve also allowed to determine the values of linear thermal expansion coefficient at the range of 21.49 up to 80.96 °C with a step of 10 °C.

Various surface modification methods are applied, including polymer coating, chemical etching, and mechanical treatment to improve the bond strength between the cement matrix and the fiber. The microstructure of the PVC fiber surface was investigated using a Quanta 650 FEG field emission scanning electron microscope (FE-SEM). Electron microscopy revealed that after shredding in shredder machine, the fiber surface undergoes changes and becomes rough (Fig. 8).

The influence of PVC-based fiber on the properties of fine-grained concrete was investigated with content of the fiber from 0 up to 3% by mass of concrete mixture. The compositions of the mixture are presented in Table 3. The fine-grained concrete mixtures were prepared in accordance with Кгыышфт ыефтвфкв GOST 30744. The

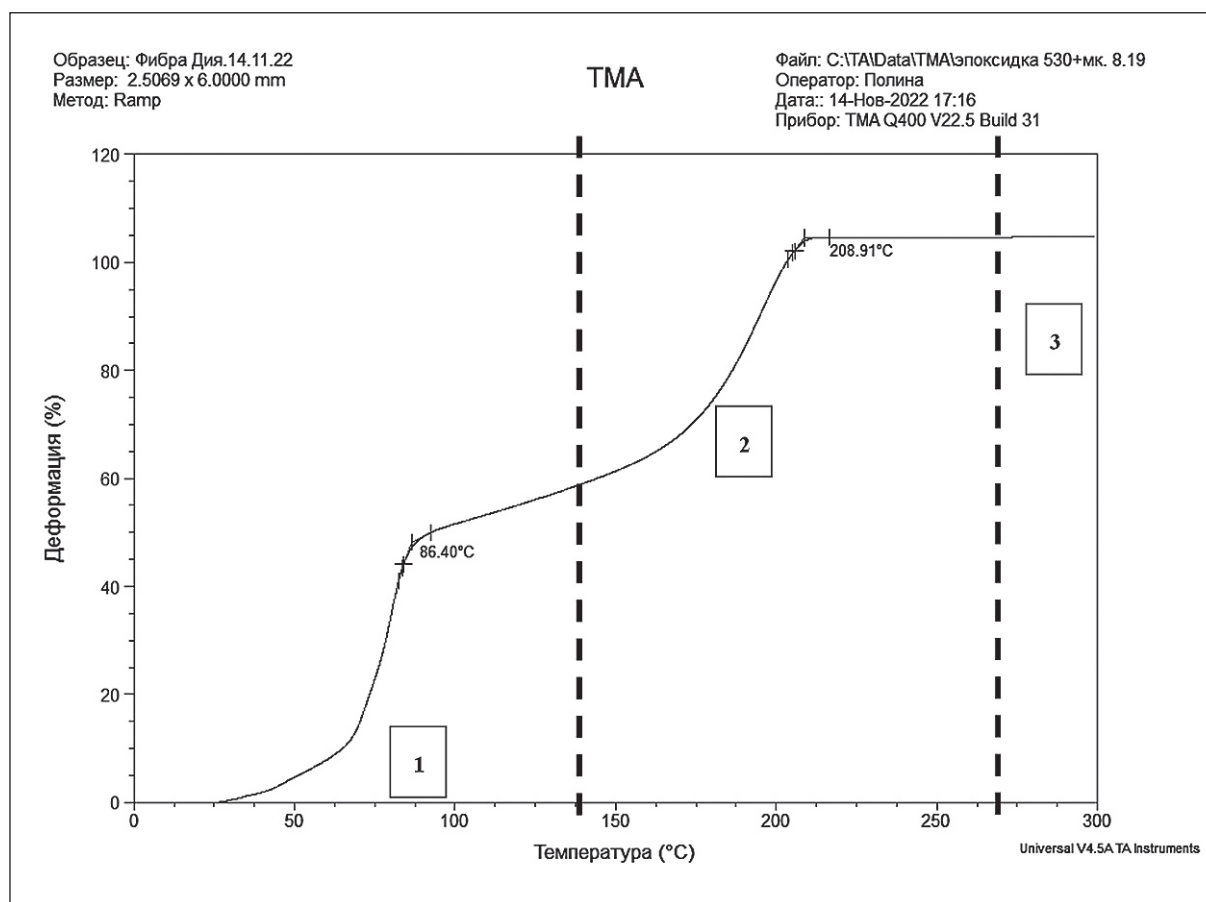


Fig. 7. Study of the thermomechanical properties of PVC-based fiber

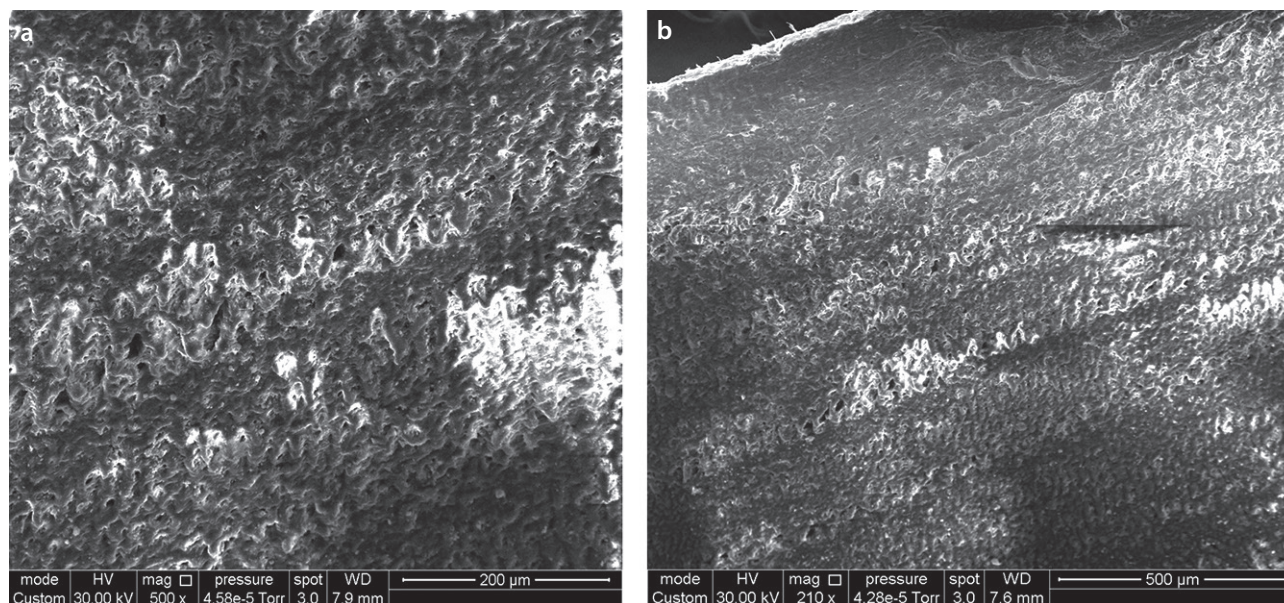


Fig. 8. Surface of recycled polyvinyl chloride fiber after shredding: a) x500 magnification; b) x210 magnification

Table 3. Mix designs of fine-grained concrete with various contents of PVC-based fiber

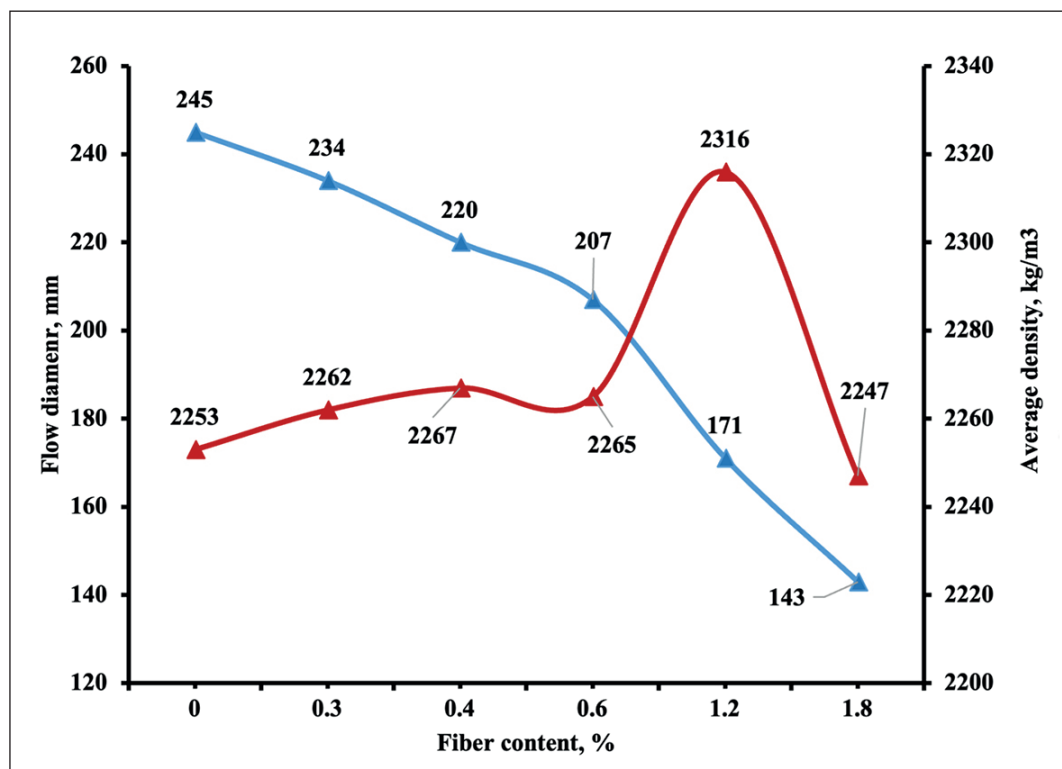
Components, g	Fiber content, %					
	0	0.3	0.4	0.6	1.2	1.8
Portland cement	655	655	655	655	655	655
Sand	1310	1310	1310	1310	1310	1310
Fiber	0	5.65	11.0	13.8	27.6	41.4
Water	295	295	295	295	295	295

gradual mixing of dry components was followed with addition of mixing water. The addition of the PVC fiber was carried out at the final stage with mixing time of 3 min.

The effect of PVC-based polymer fiber on the flow diameter of fine-grained concrete, measured with by the use of flow table, demonstrated the decrease of workability of the mixture. The minimum reduction in workability was observed with fiber contents at the range of 0.3 up to 0.6%. The average density of the mixture maintained between 2262 and 2265 kg/m³ (Fig. 9). The significant decrease in workability and average density of the concrete mixture was established with increase of the fiber content up to 1.2%. This can be explained of the high water demand to the fiber and its highly developed surface area. A further increase in fiber content up to 1.8% reduced the average density decreased to 2247 kg/m³, the flow diameter from 245 mm to 143 mm (Fig. 9), resulting in loss of cohesion

and workability. These findings are consistent with the results reported by other authors [24, 25, 26].

The influence of PVC fiber on the mechanical properties of fine-grained concrete was investigated at 28 days of standard curing in accordance with Russian standard GOST 310.4. It was found that the strength remains at the range of 8.7 MPa with fiber content of 0.4–1.2%. This behavior can be attributed to the strength provided by cement binder and the positive effect of the fiber on the structure formation process. The fiber may act as nucleation center in cement paste, organizing and densifying its microstructure [27, 28]. The formation of such a structure, consisting of randomly distributed fibers, occurs along the entire fiber surface, enhancing the interfacial transition zone between cement paste and aggregate and forming a micro frame [26]. However, the increase of the fiber content up to 1.8% leads to a decrease in average

**Fig. 9.** Effect of PVC-based fiber on the flow table diameter of fine-grained concrete

density (Fig. 10) and the strength at the range of 8.3 MPa (Fig. 11). This reduction is explained by the weakening of the cement matrix and the fact that the low-modulus fiber

occupies a portion of the cross-sectional area within the cement stone, thereby weakening it due to a deficiency in the matrix component and composite stratification [26].

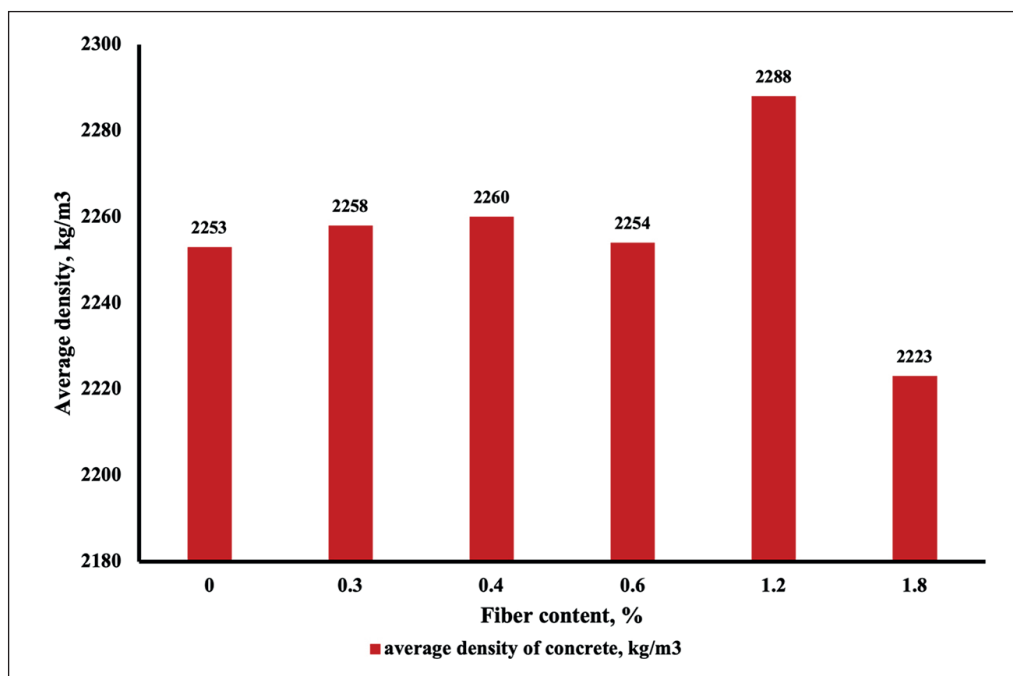


Fig. 10. Effect of polymer fiber on average density of the concrete

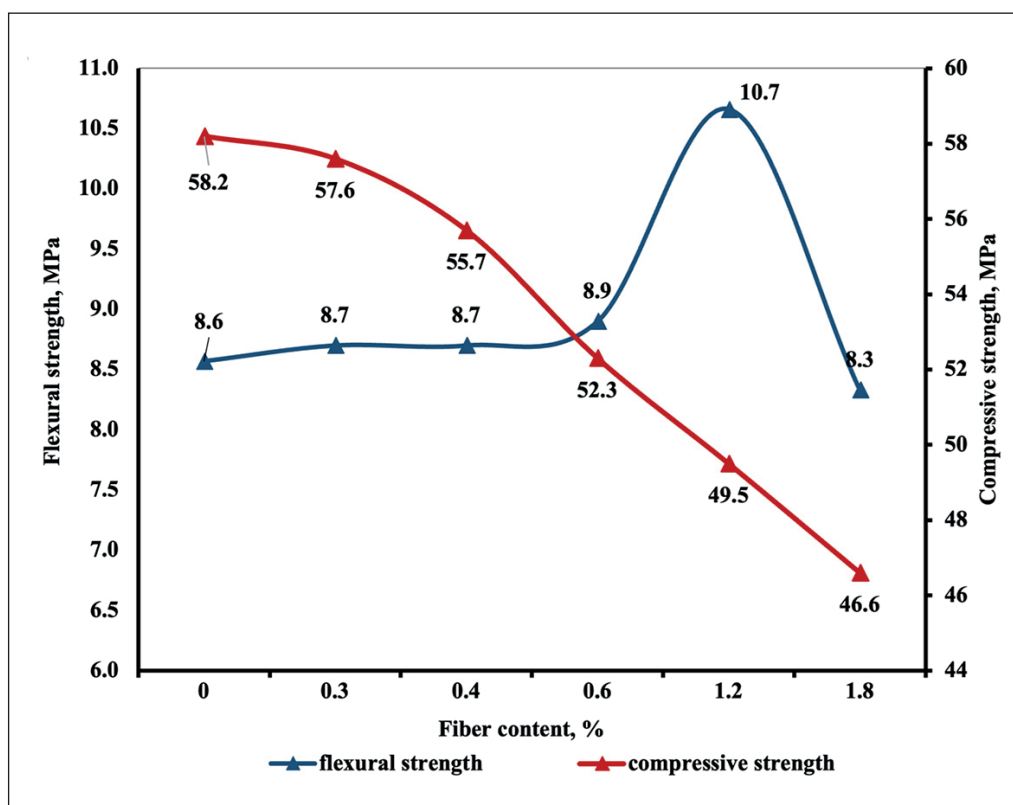


Fig. 11. Effect of PVC fiber on the compressive and flexural strengths at the age of 28 days

CONCLUSIONS

Based on the obtained results, the following conclusions can be drawn:

1. It was established that recycled PVC-based fiber can be used in fiber-reinforced concrete to enhance mechanical properties, which contributes the expansion the raw material base. This approach promotes the conservation of raw material resources, reduces negative environmental impacts, and decreases the volume of PVC-based waste.

2. It was shown that the fiber obtained from the mechanical shredding of PVC window profiles possesses a rough surface, has a length of 2.5–4 cm, a width of 1.75–4 mm, and a thickness of 0.2–0.3 mm.

3. It was established that the PVC-based fiber is an amorphous polymer with a linear structure, characterized by a glass transition temperature of 86.4 °C and a degrada-

tion temperature of 208.91 °C. These properties ensure the load-bearing capacity of the fiber within the fiber-reinforced concrete under elevated temperature operating conditions.

4. It was established the remain of workability of the fine-grained concrete with fiber content of 0.3–0.6%. However, increase of the fiber content up to 1.8% by mass of fine-grained concrete leads to 1.7 times decrease in workability, a slight decrease in the average density of the mixture, and a loss of cohesion.

5. It was established the decrease in compressive strength, that can be explained by low-modulus of PVC-based fiber. The compressive strength decreases in 1.2 times if the content is 1.8% by mass of the concrete.

6. It was determined that the optimal content of PVC-based fiber in fine-grained concrete is 1.2% which results the increase of concrete density in 1.6 times and of 22% enhancement in flexural strength.

REFERENCES

1. Rusanov V.E., Maslov P.S., Alekseev V.A. On the Effectiveness of Using Fiber Concrete Structures in Underground Construction. Experience and Prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(3):276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-16-3-276-287>. – EDN: FAEQWR. (In Russ.)
2. Piskunov A.A., Lukankin S.A., Petropavlovskikh O.K., Sharipov A.M., Ibragimova A.A. Physical and Mechanical Characteristics of Polymer-Based Composite Materials Based on Experimental Data. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(1):54–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67>. – EDN: TPGTYO. (In Russ.)
3. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. *Buildings*. 2023;13,897. <https://doi.org/10.3390/buildings13040897>
4. Aerts S., Corderi Gandara M., Rubens Geudens S., Kuwaba T., De Schrijver I., Vanbroekhoven K., Elst K. Sustainable physical recycling of rigid PVC waste: A biobased solvent approach for the recovery of PVC, TiO₂, and CaCO₃. *Waste Management*. 2025;202,114798. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114798>
5. PlasticsEurope, 2024, Plastics-The facts 2024. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (Accessed on January 2024).
6. Lyubeshkina E.G. Secondary Use of Polymer Materials. Moscow: Khimiya; 1985. (In Russ.)
7. Zaid O., Kahla N.B. Natural fiber reinforcements in cement-based composites: A review on recent advances, properties, and sustainability. *Industrial Crops and Products*. 2026;240,122520. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122520>
8. Cengiz O., Turanlı L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1357–1364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.024>
9. Hosseinzadeh H., Salehi A. M., Mehraein M., Asadollahfardi G. The effects of steel, polypropylene, and high-performance macropolypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;386:131589 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
10. Meena A., Surendranath A., Ramana P.V. Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. *Materials today. Proceedings*. 2022;50:2307–2314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.054>
11. Dong C., Zhang Q., Chen C., Jiang T., Guo Z., Liu Y., Lin S. Fresh and hardened properties of recycled plastic fiber reinforced self-compacting concrete made with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume. *Journal Building Engineering*. 2022; 62:105384. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105384>
12. Qureshi H.J., Ahmad J., Garcia-Troncoso N. Review on characteristics of concrete reinforced with nylon fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2023;8(1):1–15. <https://doi.org/10.1177/15589250231189812>
13. Talikoti R. S., Kandekar S. B. Strength and durability study of concrete structures using aramid-fiber-reinforced polymer. *Fibers*. 2019;7(2):1–11. <https://doi.org/10.3390/fib7020011>
14. Hiremath P., Yaragal S. C. Performance of polypropylene and polyester fibres-reinforced reactive powder concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2023;373,130862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130862>
15. Meza de Luna A., Uddin A. S. F. Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2020;265,120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>

16. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for Using Polymer Waste as Concrete Fillers. *Technique and Technology of Silicates*. 2024;31(3):247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261> EDNayfqsm. (In Russ.)
17. Wang J., Dong H. PVA fiber-reinforced ultrafine fly ash concrete: Engineering properties, resistance to chloride ion penetration, and microstructure. *Journal of Building Engineering*. 2023;66:105858. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105858>
18. Islam T., Safiuddin M., Roman R.A., Chakma B., Al Maroof A. Mechanical Properties of PVC Fiber-Reinforced Concrete — Effects of Fiber Content and Length. *Buildings*. 2023;13:2666. <https://doi.org/10.3390/buildings13102666>
19. Renkin C., Limbourg S. Sustainable Reverse Supply Chain Optimization: A Case Study in PVC Recycling. *IFAC-PapersOnLine*. 2025; 59(10),1772-1777. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.298>
20. Titow W.V. *PVC plastics: properties, processing and applications*. Elsevier applies science, London and New York; 1990.
21. Stichnothe H., Azapagica A. Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;71:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>
22. Setiawan A.A., Philip F.J., Permanasari E. Mechanical properties of waste plastic banner fiber reinforced concrete. *Journal of Technology*. 2018;80:113–119. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11365>
23. Teitelbaum B.Ya. *Thermomechanical Analysis of Polymers*. Moscow: Nauka, 1979. (In Russ.)
24. Bhogayata A.C., Arora N.K. Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials*. 2017;146:455–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095>
25. Adda H.M., Slimane M. Study of concretes reinforced by plastic fibers based on local materials. *International Journal Engineering Research of Africa*. 2019;42:100–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.42.100>
26. Pukharensko Yu.V., Kostrikin M.P. Resistance of fiber concrete to high-temperature exposure. *Construction and Reconstruction*. 2020;(2):96–106. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106> (In Russ.)
27. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Research of the properties of nanomodified wood-polymer composites based on polyethylene. *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(2):110–116. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116>. — EDN: NEIHAU. (In Russ.)
28. Kovalenko Yu.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S. Application of polyvinyl chloride for nanocomposites (analysis and optimization of quality indicators). *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(6): 519–530. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-519-530>. — EDN: WRQEQL. (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

Oksana A. Larsen – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, larsen.oksana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9612-7190>

Dheyaa A. N. Alobaidi – Cand. Sci. (Eng.), lecturer, Ministry of Education General Directorate of Al-Qadisiyah Education, Al Diwaniyah58001, Al-Diwaniya, Alsaray Street, 100, Iraq, dheyaa.alobaidi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1724-4903>

Svetlana V. Samchenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Oksana A. Larsen – scientific management; research concept; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Dheyaa A. N. Alobaidi – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text.

Svetlana V. Samchenko – scientific management; research concept; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.03.2026; approved after reviewing 06.04.2026; accepted for publication 12.04.2026.

Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида

Оксана Александровна Ларсен^{1*} , Дия Абдулкадим Насер Альобаиди² , Светлана Васильевна Самченко¹ 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Российская Федерация

² Министерство образования, Главное управление образования в Аль-Кадисии, 58001, Аль-Дивания, улица Альсарай, д. 100, Ирак

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Широкое применение полимерная фибра получила при производстве конструктивных бетонных элементов, в туннелях, бетонных перекрытиях, взрывостойком бетоне и жестких дорожных покрытиях. Вопросам применения в дисперсно-армированных бетонах фибры на основе вторичной переработки полимеров в последнее время посвящено множество исследований. Большинство из них затрагивает влияние фибры на прочностные свойства бетона на сжатие, при изгибе и на растяжение. Применяются различные по длине волокна в бетонах на основе нейлона, арамида, полиэстера, полиэтилентерефталата, полипропилена, поливинилового спирта и поливинилхлорида. Однако недостаточное количество данных либо их полное отсутствие о влиянии на свойства бетона с полимерной фиброй на основе переработанного ПВХ вызывает необходимость дополнительных исследований, что особенно актуально ввиду образования значительных объемов отходов ПВХ при производстве пластиковых окон. **Материалы и методы.** В работе применены методы электронной микроскопии и термомеханического анализа для исследования свойств полимерной фибры на основе ПВХ. Для исследования влияния полимерной фибры на свойства мелкозернистых бетонных смесей и затвердевшего бетона применялись стандартные методы исследования, включающие определение диаметра расплыва на встряхивающем столике, среднюю плотность бетонных смесей и бетонов, прочность на растяжение при изгибе и при сжатии. **Результаты исследования.** Методом электронной микроскопии установлено положительное влияние процесса измельчения, позволяющего получить шероховатую поверхность и фибру с длиной 2,5–4 см, шириной 1,75–4 мм и толщиной 0,2–0,3 мм. Установлена принадлежность фибры на основе ПВХ к аморфным полимерам линейного строения с температурой стеклования 86,4 °С и температурой деструкции 208,91 °С. Установлено оптимальное содержание фибры, которое не ухудшает подвижность бетонных смесей и не нарушает их связность и удобообрабатываемость. Показано, что введение фибры на основе ПВХ в состав мелкозернистого бетона в количестве до 1,2% обеспечивает рост плотности бетона в 1,6 раз, повышение прочности при растяжении с изгибом на 22% и не оказывает влияния на прочность при сжатии. **Заключение.** Проведенные исследования подтвердили возможность применения фибры на основе поливинилхлорида в составе мелкозернистых бетонов. Однако недостаточное количество данных о порядке введения для предотвращения ее комкования, совместимости с химическими добавками, вводимыми в бетонную смесь, а также влияния условий твердения и дальнейшей области применения бетонов, в состав которых она входит, вызывает необходимость дальнейшего научного поиска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: портландцемент, дисперсно-армированный бетон, фибра, рециклинг поливинилхлорида, подвижность, прочность

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная работа выполнялась при финансировании Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ларсен О.А., Альобаиди Д., Самченко С.В. Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber

Oksana A. Larsen^{1*} , Dheyaa A. N. Alobaidi² , Svetlana V. Samchenko¹ 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

² Ministry of Education General Directorate of Al-Qadisiyah Education, Al Diwaniyah, 58001, Al-Diwaniya, Alsaray Street, 100, Iraq

* Corresponding author: e-mail: larsen.oksana@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Polymer fiber is widely used in the production of structural concrete components, in shotcrete for tunnels, concrete slabs, blast-resistant concrete, and solid road pavements. Recently, numerous studies have been devoted to the use of fibers derived from recycled polymers in fiber-reinforced concrete. Most of these studies address the effect of fiber on the compressive, flexural and tensile strength properties of concrete. Fibers of various lengths based on nylon, aramid, polyester, polyethylene terephthalate, polypropylene, polyvinyl alcohol, and polyvinyl chloride are used in concrete. However, the insufficient amount of data, or its complete absence, regarding the effect on the properties of concrete with polymer fibers based on recycled PVC necessitates further research, which is particularly relevant given the generation of significant volumes of PVC waste during the production of plastic windows. **Materials and methods.** The electron microscopy and thermomechanical analyses (TMA) were used to investigate the properties of PVC-based polymer fibers. The effect of the polymer fiber on properties of fine-grained concrete mixtures and hardened concrete, the standard testing methods were used, including the determination of workability by flow table test diameter on a vibrating plate, the average density of concrete mixtures and concrete, and tensile strength under flexural and compressive loading. **Results.** It is shown the positive effect of the grinding process determined by electron microscopy, which produces a rough surface and fibers of 2.5–4 cm in length, 1.75–4 mm in width, and 0.2–0.3 mm in thickness. It is established that the PVC-based fiber belongs to amorphous polymers of linear structure with a crystallization temperature of 86.4 °C and a destruction temperature of 208.91 °C. It is determined that the optimal fiber content in concrete does not impair the workability of concrete mixtures or affect their cohesion. It is shown that the addition of PVC-based fiber to fine-grained concrete in amount up to 1.2% increases the concrete density of 1.6 times, increases flexural tensile strength by 22%, and has no effect on compressive strength. **Conclusion.** Conducted studies confirm the feasibility of using polyvinyl chloride-based fiber as a component of fine-grained concretes. However, there is the lack of sufficient data of fiber introduction method in concrete which requires additional scientific research to prevent fiber clumping, establish its compatibility with chemical additives added to the concrete mixture and the effect of curing conditions.

KEYWORDS: Portland cement, fiber-reinforced concrete, fiber, recycled polyvinyl chloride, workability, strength

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Larsen O.A., Alobaidi D., Samchenko S.V. Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности бетонов включает не только улучшение их прочностных и эксплуатационных характеристик, но и производство новых композиционных материалов, к которым можно отнести дисперсно-армированные бетоны [1]. Разработка составов фибробетонов с повышенной прочностью, трещиностойкостью и морозостойкостью, водонепроницаемостью, а также стойкостью к истиранию и ударам является наиболее перспективным направлением в области строительного материаловедения. Положительное влияние на свойства бетона оказывают волокна различного происхождения. В качестве фибры могут применяться полимерные, стеклянные,

углеродные, гибридные и растительные волокна различной формы и размеров. Применение металлической фибры получило наибольшее распространение не только в нашей стране, но и за рубежом.

Широкое применение полимерная фибра получила при производстве конструктивных бетонных элементов, в торкрет-бетонировании туннелей, бетонных перекрытиях, взрывостойком бетоне и жестких дорожных покрытиях [2]. В последние годы отдается предпочтение использованию в качестве армирующих волокон вторичных волокнистых материалов из отходов различных отраслей промышленности. Более 90% производимых полимеров по-прежнему изготавливаются из первичных полимеров, только незначительная часть подвергается

переработке [3, 4]. Отмечается [5, 6], что только 32% пластиковых отходов перерабатывается, остальные отходы либо сжигаются (43%), либо выбрасываются на свалку (25%), нанося вред окружающей среде.

Производство пластмасс к настоящему времени достигло огромных масштабов, что также сопутствовало одновременному увеличению количества отходов на их основе. Объем производства пластиковых отходов с 1950 по 2017 год составил 8,3 миллиарда тонн, а в 2021 году он достиг около 400 миллионов тонн в год, и только 9% этого объема было переработано полностью и успешно применялось. По данным [5], объем мирового производства пластмасс в 2023 достиг 413,8 млрд в миллион тонн, из них только 8,9% было отправлено на переработку и только 0,5% использовано для производства изделий.

Срок службы пластмассовых изделий составляет в среднем около 10 лет, а разложение пластмассы длится в течение многих лет, что зависит от состава и способа утилизации [6].

В последние годы повышенный интерес проявляется к изучению влияния полимерной фибры, полученной путем рециклинга, на статические и динамические механические свойства бетона [7], усталостные характеристики [8, 9] и характеристики, связанные с долговечностью. Было обнаружено, что введение переработанного полимерного волокна может уменьшить усадку бетона в раннем возрасте и таким образом повысить механические свойства и долговечность [10]. Наряду с использованием полипропиленовых волокон, введение переработанного полимерного волокна в бетон эффективно предотвращает развитие трещин и повышает устойчивость бетона к замораживанию–оттаиванию [10]. Фибробетон широко используется в качестве материала для дорожного покрытия аэропортов и автомагистралей, настилов мостов, облицовки туннелей и морских платформ [11]. Эти типы изделий подвергаются повторяющимся циклическим нагрузкам в течение всего срока службы. Существует эффективное применение полимерной фибры в бетоне со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками для ремонта и армирования колонн мостов, подверженных воздействию хлоридсодержащих вод. Введение фибры в бетонную смесь значительно уменьшает трещинообразование и ширину раскрытия трещин, которые появляются в результате усадки бетона при его твердении и последующем уходе, что также повышает ударную прочность бетона.

Имеется опыт применения волокон на основе полиэтилентерефталата, полученных из отходов переработки бутылок, применяется фибра и наполнитель на основе полиэтилена, полученного переработкой пакетов низкой и высокой плотности, наполнителей на основе отходов переработки труб из поливинилх-

лорида, а также наполнителя и фибры на основе поливинилхлорида (ПВХ). Также применяется в бетоне фибра, полученная из переработанных электрических кабелей. Имеет место применение различных по длине волокон на основе нейлона [12], арамида [13], полиэстера [14], полиэтилентерефталата [15], полипропилена [16], поливинилового спирта [17], поливинилхлорида [18]. Производство материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ) занимает третье место в мире и составляет примерно 3 млн. тонн [19], что обусловлено высокой химической и атмосферостойкостью, универсальными физико-механическими свойствами в сочетании с низкой стоимостью, разнообразными возможностями переработки, а также возможностью модифицирования свойств и получения широкой номенклатуры материалов [20].

Имеет место применение в дисперсно-армированных бетонах фибры из переработанного поливинилхлорида длиной от 30 до 50 мм и диаметром до 4 мм. Исследование влияния фибры из переработанного ПВХ на технологические и прочностные свойства бетонных смесей и бетонов показало, что введение 1% от массы цемента в бетонную смесь снижает подвижность смеси на 6,67% [21]. Отмечается повышение прочности на сжатие, изгиб и растяжение бетона при введении фибры в количестве 0,6%, 0,8% и 1,0%. Установлено, что введение фибры из переработанного ПВХ в количестве 0,8% приводит к увеличению прочности на сжатие на 30,8%, при изгибе на 9,11%. Установлено, что при увеличении содержания фибры более 0,8% прочность бетона снижается.

По данным [22], введение в бетон волокон на основе переработанного ПВХ длиной 40 мм и толщиной 0,5 мм в количестве 0,5% по объему бетона способствует увеличению на 14,28% прочности на растяжение с изгибом.

Переработка оконных профилей из ПВХ является сложным технологическим процессом. Термическая обработка ПВХ сопровождается выделением хлористого водорода, и это требует соблюдения определенных условий безопасности при работе персонала и получении высокого качества регранулята ПВХ. Переработка профиля включает предварительную обработку, измельчение, сортировку и фракционирование, мойку, экструзию с фильтрацией расплава. Было проведено ограниченное количество исследований о влиянии переработанных волокон на основе различных полимеров.

Вопросам применения в дисперсно-армированных бетонах фибры на основе вторичной переработки полимеров в последнее время посвящено множество исследований. Большинство из них затрагивает влияние фибры на прочностные свойства бетона на сжатие, при изгибе и на растяжение. Однако не-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

достаточное количество данных либо их полное отсутствие о влиянии на свойства бетона с полимерной фиброй на основе переработанного ПВХ вызывает необходимость дополнительных исследований, что особенно актуально ввиду образования значительных объемов отходов ПВХ при производстве пластиковых окон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе применялись следующие материалы:

- В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 52,5Н производства АО «Хайдебергцемент Рус» по ГОСТ 31108-2020 «Цементы

общестроительные. Технические условия» с водопотребностью 30,2%; сроками схватывания: нс – 150 мин, кс – 175 мин; $S_{уд.}$ – 377,3 м²/кг, активностью в возрасте 28 суток – 76 МПа. Минералогический и химический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус» приведен в таблицах 1 и 2.

- Кварцевый песок I класса с $M_k = 2,72$ производства «Боларс» с истинной плотностью 2,65 г/см³ и гранулометрическим составом приведен на рисунке 1.
- Фибра из переработанного поливинилхлорида, полученная измельчением оконного профиля в рубильной машине с внешним видом, представлена на рисунке 2.

Таблица 1. Минералогический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус»

Содержание минералов, %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64	14	7	11

Таблица 2. Химический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус»

Содержание компонентов, %											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	п.п.п.
21,23	4,78	3,31	62,95	1,65	3,22	0,66	0,12	0,08	0,28	0,06	1,60

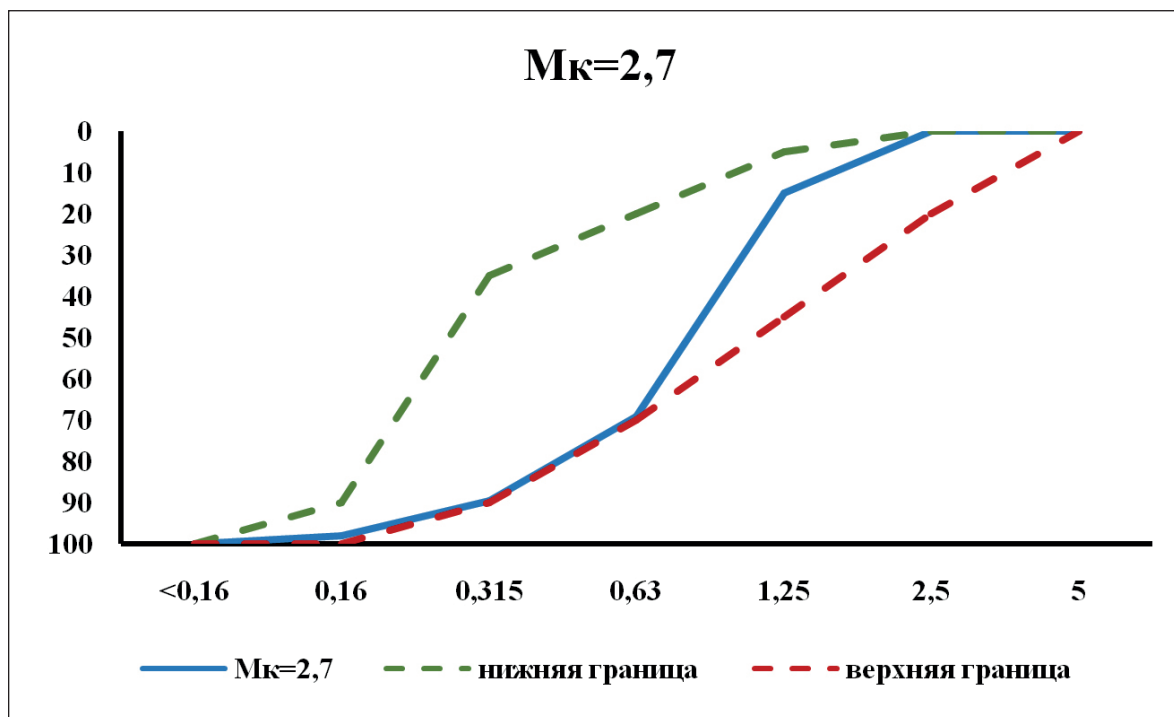


Рис. 1. Гранулометрический состав мелкого заполнителя

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

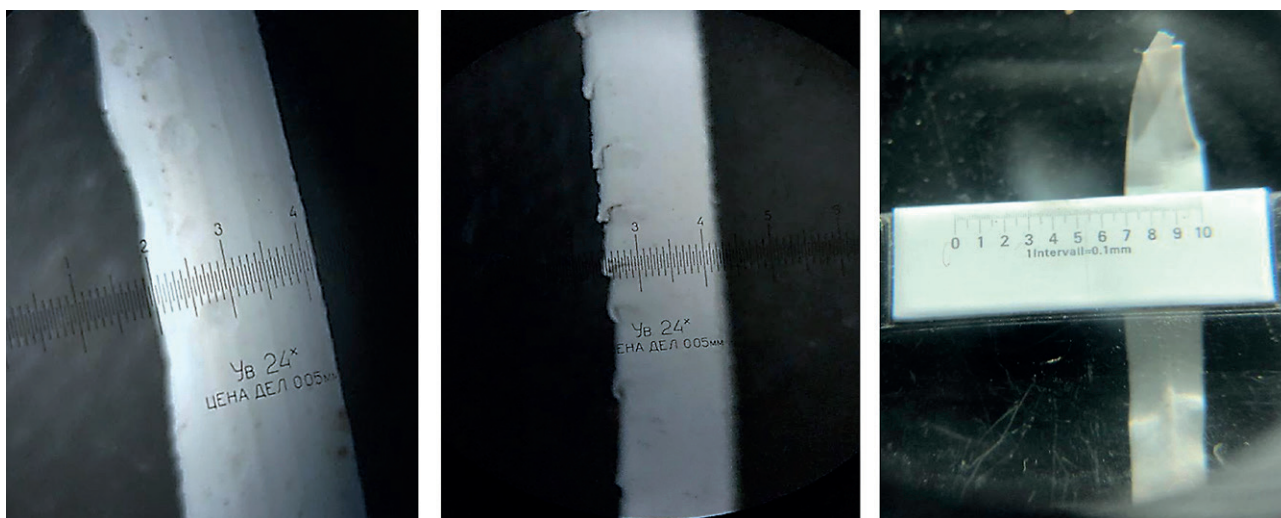


Рис. 2. Внешний вид фибры из переработанного поливинилхлорида

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технологическая схема представлена на рисунке 3. Получение полимерной фибры на основе переработанных отходов оконного профиля из поливинилхлорида производилось путем измельчения в рубильной машине и включало отделение стеклопакета и уплотнительных резинок от оконного профиля (рис. 4). В случае переработки отходов от раскройки и нарезки оконных рам необходимо удаление защитной пленки с поверхности. Измельчение профиля в рубильной машине в одну стадию позволяет получить полимерную фибру с шероховатой поверхностью длиной от 2,5 до 4 см; шириной от 1,75 до 4 мм и толщиной от 0,2 до 0,3 мм (рис. 5).



Рис. 3. Получение фибры на основе поливинилхлорида из оконного профиля



Рис. 4. Получение фибры в рубильной машине

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Исследование фазовых и релаксационных состояний свойств фибры на основе поливинилхлорида поливинилхлоридного полимера и определение деформаций при силовом и тепловом воздействии на образец проводилось с помощью оборудования, представленного на рисунке 6. Для определения температур стеклования и деструкции, а также коэффициента линейного термического расширения был использован термомеханический анализатор ТМА Q400 производства «TA Instruments». Образец для испытаний полимера в виде волокна представлен на рисунке 7.

Под термомеханическими свойствами полимеров обычно понимают характеристику механического поведения полимеров под влиянием различных температур [23]. Метод ТМА используется для определения природы полимера, температур кристаллизации, стеклования, плавления, оценки температур-

ных областей работы полимера и т.д. В результате эксперимента было установлено, что полученные данные значительно зависят от условий проведения эксперимента, предварительной обработки, прошедшей при получении поливинилхлоридного профиля, режимов силового и теплового воздействия и т.д. При построении термомеханической кривой нагрузка на образец составила 1 Ньютон, а подъем температуры осуществлялся со скоростью 5 °С. Анализ данных, полученных на основании данных ТМА, показал (рис. 7), что фибра на основе поливинилхлорида относится к аморфным полимерам линейного строения. Анализ кривой на участке 1 при нагревании в интервале температур от 0 до 86,4 °С, соответствующей температуре стеклования, который свидетельствует о том, что полимер относится к аморфным полимерам с линейной структурой (рис. 7) и соответствует стеклообразному состоянию,



Рис. 5. Оборудование для определения геометрических размеров фибры

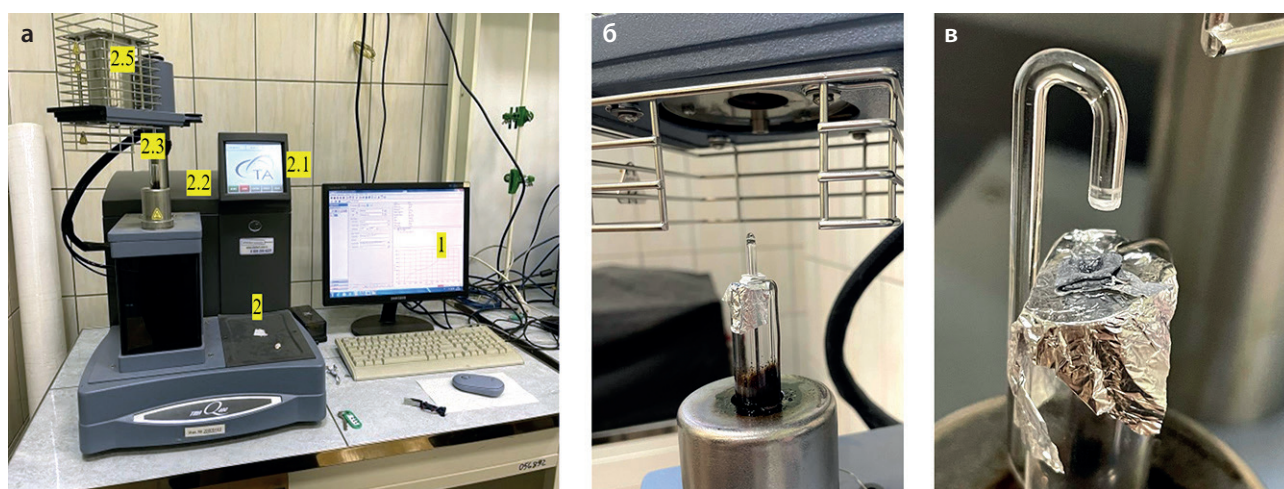


Рис. 6. Исследование термомеханических свойств фибры на основе поливинилхлорида: а) 1 – компьютер; 2 – прибор для ТМА; 2.1 – дисплей; 2.2 – предметный столик; 2.3 – зонд; 2.4 – термора; 2.5 – печь; б) образец фибры до испытания; в) образец после испытания

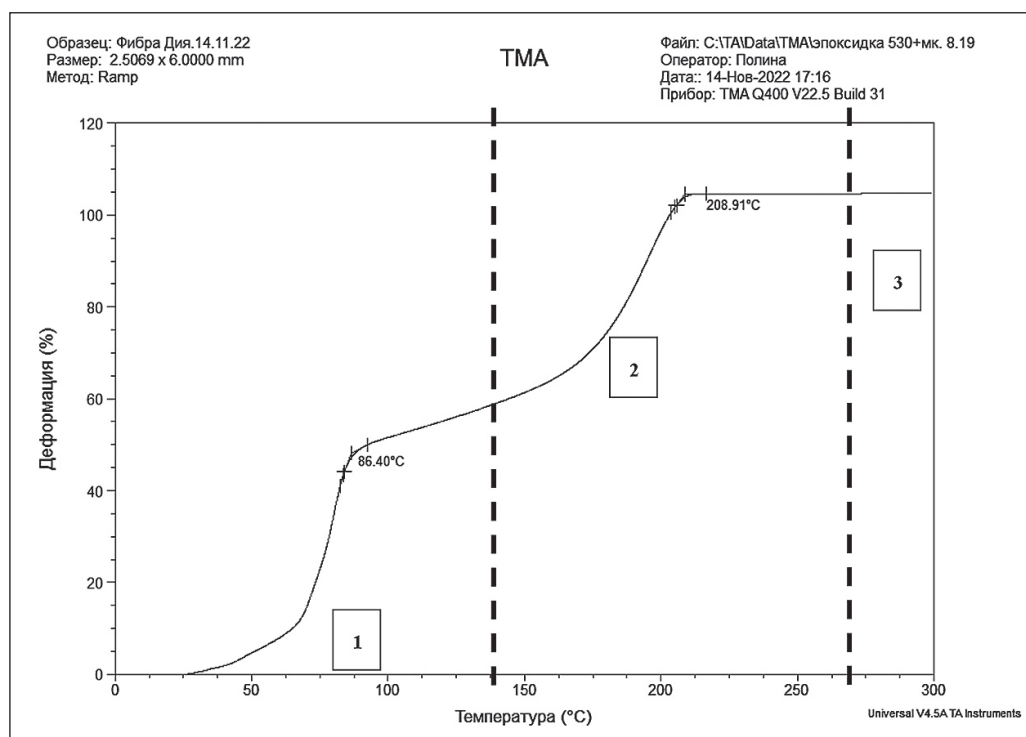


Рис. 7. Исследование термомеханических свойств фибры на основе ПВХ

участок 2 соответствует высокоэластическому состоянию, а участок 3 – вязкотекучему состоянию, соответствующему температуре деструкции 208,91 °С. Для определения КЛТР подъем температуры осуществлялся со скоростью 5 °С и нагрузкой на образец 0,01 Н. Построение термомеханической кривой также позволило установить значение КЛТР на участке от 21,49 до 80,96 °С с шагом 10 °С.

Для улучшения адгезионной прочности между цементной матрицей и фиброй применяются различные способы модификации ее поверхности, к которым можно отнести покрытие полимерами, химическое травление, механическую обработку. Исследование микроструктуры поверхности фибры ПВХ проводилось с помощью растрового электронного микроскопа с автоэмиссионным катодом Quanta 650 FEG. Методом электронной микроскопии установлено, что после измельчения в рубильной машине поверхность фибры изменяется и становится шероховатой (рис. 8).

Исследовалось влияние фибры на основе ПВХ на свойства мелкозернистого бетона при ее содержании в количестве от 0 до 3% по массе бетона, составы которого представлены в таблице 3. Приготовление мелкозернистой бетонной смеси проводилось в соответствии с ГОСТ 30744 и заключалось в последовательном смешении сухих компонентов, дальнейшем введении воды затворения и окончательном перемешивании бетонной смеси с введением фибры ПВХ. Время перемешивания составило 3 мин.

Исследование влияния полимерной фибры на основе ПВХ на изменение диаметра расплыва

мелкозернистого бетона с помощью встряхивающего столика показало, что при увеличении количества фибры подвижность мелкозернистого бетона снижается. Минимальное снижение подвижности наблюдалось при содержании фибры от 0,3 до 0,6% и составило 2262–2265 мм. Увеличение содержания фибры до 1,2% привело к значительному снижению подвижности средней плотности бетонной смеси, что можно объяснить высокой водопотребностью фибры и ее развитой поверхностью. Дальнейшее увеличение содержания фибры до 1,8% снижает подвижность с 245 до 143 мм с нарушением связности и удобообрабатываемости смеси, а также снижением средней плотности бетонной смеси до 2247 кг/м³, что подтверждается в работах других авторов [24, 25, 26]

Исследовалось влияние ПВХ фибры на прочностные свойства мелкозернистого бетона в возрасте 28 сут. нормального твердения в соответствии с ГОСТ 310.4. Установлено, что при содержании фибры в количестве от 0,4 до 1,2% прочность практически не изменяется и находится в пределах 8,7 МПа, что можно объяснить прочностью, обеспечиваемой цементным вяжущим, что можно объяснить положительным влиянием фибры на процесс структурообразования, которая может выступать в роли центров кристаллизации цементного теста, упорядочивая и уплотняя его структуру [27, 28]. Формирование такой структуры из хаотично распределенных волокон происходит вдоль всей поверхности фибры, обеспечивая улучшение контактной зоны цементного камня улучшенного

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

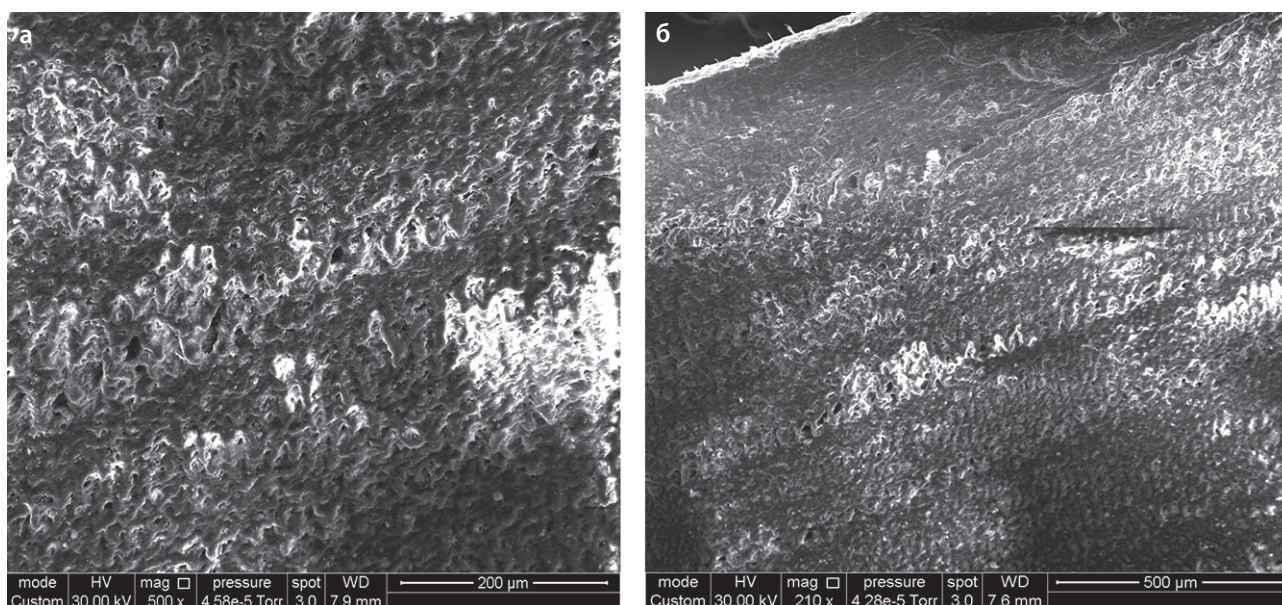


Рис. 8. Поверхность фибры из переработанного поливинилхлорида после измельчения: а – увеличение x500; б – увеличение x210

Таблица 3. Составы мелкозернистого бетона смесей с различным содержанием фибры на основе ПВХ

Компоненты, г	Содержание фибры, %					
	0	0,3	0,4	0,6	1,2	1,8
Портландцемент	655	655	655	655	655	655
Песок	1310	1310	1310	1310	1310	1310
Фибра	0	5,65	11,0	13,8	27,6	41,4
Вода	295	295	295	295	295	295



Рис. 9. Исследование влияния фибры на основе ПВХ на изменение диаметра расплыва мелкозернистого бетона

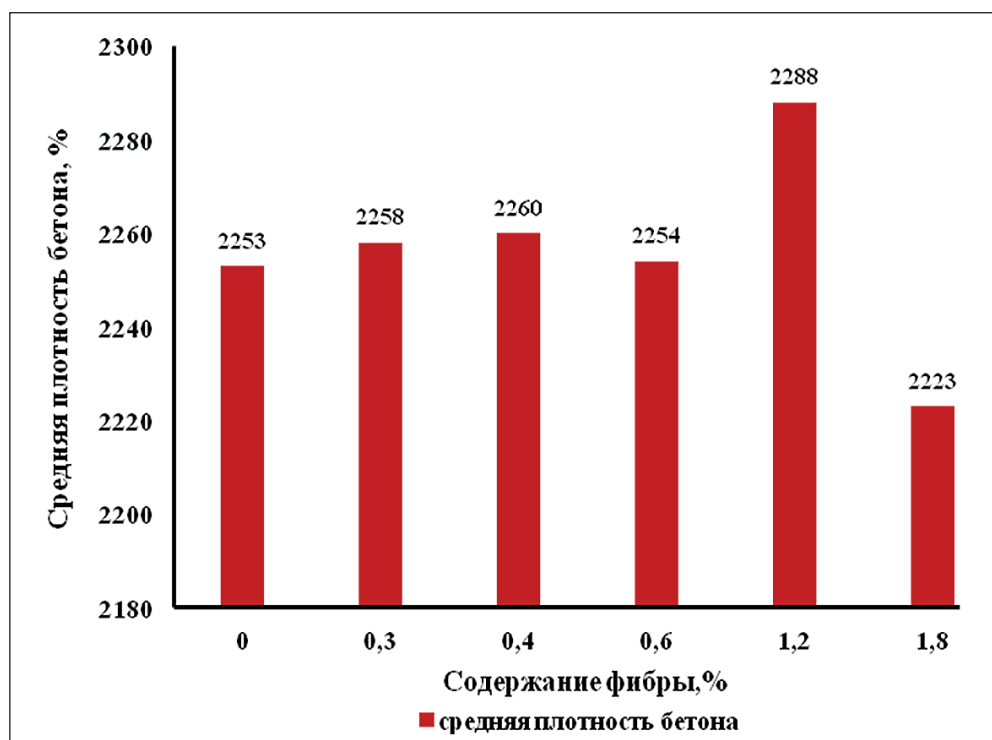


Рис. 10. Исследование влияния полимерной фибры на изменение средней плотности бетона



Рис. 11. Исследование влияния ПВХ фибры на прочность при сжатии и на растяжение с изгибом в возрасте 28 сут.

качества, образуется еще и микрокаркас [26]. Увеличение содержания фибры до 1,8% приводит к снижению прочности до 8,3 МПа и снижению средней плотности, что объясняется разупрочнением цементной матрицы и тем, что низко модульная фибра занимает часть площади рабочего сечения в объеме цементного камня, ослабляя его из-за недостатка матричной составляющей и расслоения композита [26].

ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Установлена возможность применения фибры на основе переработанного поливинилхлорида, способствующая расширению сырьевой базы для производства дисперсно-армированных бетонов,

экономии сырьевых ресурсов, а также уменьшению отрицательного воздействия на окружающую среду и снижению количества отходов на основе поливинилхлорида.

2. Установлено методом электронной микроскопии, что фибра, полученная измельчением ПВХ профилей для изготовления пластиковых окон, имеет шероховатую поверхность длины 2,5–4 см; ширину 1,75–4 мм и толщину 0,2–0,3 мм.

3. Методом термомеханического анализа установлено, что ПВХ фибра относится к аморфным полимерам линейного строения с температурой стеклования 86,4 °С и температурой деструкции 208,91 °С, что обеспечит ее несущую способность в составе дисперсно-армированных бетонов при эксплуатации в условиях повышенных температур.

4. Установлено, что введение ПВХ фибры в количестве от 0,3 до 0,6% не оказывает значительного

влияния на технологические свойства бетонной смеси. Увеличение содержания до 1,8% по массе мелкозернистого бетона приводит к уменьшению подвижности в 1,7 раз, незначительному снижению средней плотности бетонной смеси, нарушению связности и удобообрабатываемости смеси.

5. Установлено, что с увеличением содержания низко модульной ПВХ фибры прочность при сжатии снижается. Введение ПВХ фибры в количестве 1,8% по массе бетона снижает прочность при сжатии в 1,2 раза.

6. Установлено оптимальное содержание ПВХ фибры в составе мелкозернистого бетона, которое находится в пределах 1,2%. Введение фибры в таком количестве обеспечивает увеличение плотности бетона в 1,6 раз, повышение прочности при растяжении с изгибом на 22% и не оказывает влияния на прочность при сжатии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А. Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(3):276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-16-3-276-287>. – EDN: FAEQWR.
2. Пискунов А.А., Луканкин С.А., Петропавловских О.К., Шарипов А.М., Ибрагимова А.А. Физико-механические характеристики композитных материалов на основе полимеров по экспериментальным данным. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):54–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67>. – EDN: TPGTYO.
3. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. *Buildings*. 2023;13,897. <https://doi.org/10.3390/buildings13040897>
4. Aerts S., Corderi Gandara M., Rubens Geudens S., Kuwaba T., De Schrijver I., Vanbroekhoven K., Elst K. Sustainable physical recycling of rigid PVC waste: A biobased solvent approach for the recovery of PVC, TiO₂, and CaCO₃. *Waste Management*. 2025;202,114798. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114798>
5. PlasticsEurope, 2024, Plastics-The facts 2024. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (Accessed on January 2024).
6. Любешкина Е. Г. *Вторичное использование полимерных материалов*. М.: Химия, 1985.195 с.
7. Zaid O., Kahla N.B. Natural fiber reinforcements in cement-based composites: A review on recent advances, properties, and sustainability. *Industrial Crops and Products*. 2026;240,122520. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122520>
8. Cengiz O., Turanli L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1357–1364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.024>
9. Hosseinzadeh H., Salehi A. M., Mehraein M., Asadollahfardi G. The effects of steel, polypropylene, and high-performance macropolypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;386:131589 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
10. Meena A., Surendranath A., Ramana P.V. Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. *Materials today. Proceedings*. 2022;50:2307–2314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.054>
11. Dong C., Zhang Q., Chen C., Jiang T., Guo Z., Liu Y., Lin S. Fresh and hardened properties of recycled plastic fiber reinforced self-compacting concrete made with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume. *Journal Building Engineering*. 2022; 62:105384. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105384>
12. Qureshi H.J., Ahmad J., Garcia-Troncoso N. Review on characteristics of concrete reinforced with nylon fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2023;8(1):1-15. <https://doi.org/10.1177/15589250231189812>
13. Talikoti R. S., Kandekar S. B. Strength and durability study of concrete structures using aramid-fiber-reinforced polymer. *Fibers*. 2019;7(2):1-11. <https://doi.org/10.3390/fib7020011>
14. Hiremath P., Yaragal S. C. Performance of polypropylene and polyester fibres-reinforced reactive powder concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2023;373,130862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130862>
15. Meza de Luna A., Uddin A. S. F. Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2020;265,120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>

16. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона. *Техника и технология силикатов*. 2024;31(3):247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>. – EDN: AYFQSM
17. Wang J., Dong H. PVA fiber-reinforced ultrafine fly ash concrete: Engineering properties, resistance to chloride ion penetration, and microstructure. *Journal of Building Engineering*. 2023;66,105858. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105858>
18. Islam T., Safiuddin M., Roman R.A., Chakma B., Al Maroof A. Mechanical Properties of PVC Fiber-Reinforced Concrete – Effects of Fiber Content and Length. *Buildings*. 2023;13,2666. <https://doi.org/10.3390/buildings13102666>
19. Renkin C., Limbourg S. Sustainable Reverse Supply Chain Optimization: A Case Study in PVC Recycling. *IFAC-PapersOnLine*. 2025; 59(10),1772–1777. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.298>
20. Titow W.V. *PVC plastics: properties, processing and applications*. Elsevier applies science, London and New York; 1990.
21. Stichnothe H., Azapagica A. Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;71:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>
22. Setiawan A.A., Philip F.J., Permanasari E. Mechanical properties of waste plastic banner fiber reinforced concrete. *Journal of Technology*. 2018;80:113–119. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11365>
23. Teitelbaum B.Ya. *Thermomechanical Analysis of Polymers*. Moscow: Nauka, 1979. (In Russ.)
24. Bhogayata A.C., Arora N.K. Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials*. 2017;146:455–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095>
25. Adda H.M., Slimane M. Study of concretes reinforced by plastic fibers based on local materials. *International journal Engineering Research of Africa*. 2019;42:100–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.42.100>
26. Пухаренко Ю.В., Кострикин М.П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию. *Строительство и реконструкция*. 2020;(2):96–106. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106>. – EDN: HIMESM
27. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(2):110–116. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116>. – EDN: NEIHAU
28. Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С. Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества). *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(6): 519–530. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-519-530>. – EDN: WRQEQL

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

Ларсен Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, larsen.oksana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9612-7190>

Альобаиди Дия Абдулкадим Насер – кандидат технических наук, преподаватель, Министерство образования, Главное управление образования в Аль-Кадисии, 58001, Аль-Дивания, улица Альсарай, д. 100, Ирак, dheyaa.alobaidi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1724-4903>

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Ларсен О.А. – научное руководство; разработка методики; написание проекта статьи; участие в разработке программы исследований и ее реализации; концепция исследования; заключительные выводы.

Альобаиди Дия Абдулкадим Насер – участие в разработке программы исследований и её реализации, доработка текста.

Самченко С.В. – научное руководство; разработка методики; написание проекта статьи; участие в разработке программы исследований и ее реализации; концепция исследования; заключительные выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 12.04.2026.

PUBLICATION ETHICS AND PREVENTION OF MALPRACTICE PUBLICATION

Compliance requirements of publication ethics in the preparation and publication of the journal Science Editor and Publisher apply to all members of the publishing process, i.e., authors, editors, reviewers, and the publisher of the journal. The editorial board monitors compliance with the ethics requirements based on the manuals prepared by international specialized organizations, associations and publishers, as well as the Association of Science Editors and Publishers. The main standards relied on by the journal «Nanotechnologies in construction» are those developed by the Committee on Publication Ethics ([Committee on Publication Ethics](#)) in the United Kingdom, by the [publisher Elsevier](#) (Netherlands), and other non-Russian editorial associations and information systems, as well as the [declaration of «Ethical Principles of Scientific Publications»](#), adopted by the Association of Science Editors and Publishers (Russia).

The responsibility of the authors of material for the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The author submits materials for review, which have not been previously published. If the article is based on previously published material which are not academic articles or based on materials presented on the Internet, the author should notify the editorial staff of the journal.
2. The author does not submit the same article to different journals for review.
3. All co-authors consent to the submission of their articles to the journal.
4. The author should inform the editorial staff about a potential conflict of interest. In the case of the absence of any competing interests the author should claim that by writing «Author declare the absence of any competing interests» in the paper.
5. The author takes the necessary steps to ensure the correctness of citations in the submitted article.
6. The list of authors included only individuals who have made significant contributions to the research.
7. The author correctly cites his or her previous work as to avoid self-plagerism in the manuscript and the artificial increase of volume of publications (salami-slicing).
8. The author, who is acting as the contact with journal, informs all other co-authors of all changes and suggestions from the editorial staff, and does not make decisions regarding the article alone without the written consent of all co-authors.
9. The author properly corresponds with the reviewer through contact with the editor and responds to comments and observations if they arise.
10. If necessary, the authors either adjust the data presented in the article, or refute them.

Responsibility of the editors of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editors are personally and independently responsible for the content of the materials published and recognize that responsibility. The reliability of the work in question and its scientific significance should always be the basis in the decision to publish.
2. The editors of the journal can check the materials with anti-plagiarism system «Antiplagiat» detecting borrowed fragments to provide copyright protection.
3. The editors make fair and objective decisions, regardless of any commercial considerations and provide a fair and efficient process for the independent review.
4. The editors evaluate manuscripts' intellectual content without regard to race, gender, sexual orientation, religion, origin, nationality, and/or the political preferences of the authors.
5. The editors do not work with articles for which they have a conflict of interest.
6. The editors resolve conflict situations arising during the editorial process, as well as use all available means to resolve these situations.
7. The editors of the journal publish information concerning corrections, rebuttals, and review articles in case the need arises.
8. The editors of the journal do not publish the final version of the article without the consent of the authors.

The responsibility of the reviewers of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The reviewer evaluates his or her own availability before the examination of the manuscript and accepts materials for review only if the reviewer is able to allow for sufficient time as to ensure the quality his or her work.
2. The reviewer must use the form created by the editors and delivered with paper. The reviewer may give extended review.
3. The reviewer notifies the editorial staff of any conflict of interest (if one exists) before the start of the review of the paper.
In the case of the absence of any competing interests the reviewer should claim that by writing «The reviewer declares the absence of any competing interests» in the review.
4. The reviewer does not send information about the article and or any of the data contained within the article to any third party.
5. The reviewer does not use the information obtained from the article for any personal and or commercial purposes.
6. The reviewer does not make conclusions about the quality of the article on the basis of subjective data, e.g. the personal relationship to the author, gender, age, religion, etc.
7. The reviewer uses only proper and appropriate language and explanations in respect to the articles, avoiding any personal remarks.

The responsibility of the publisher of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The publisher not only supports scientific communication and invests in the process, but is also responsible for complying with all current guidelines and standards for publishing scientific work.
2. The publisher does not affect the editorial policy of the journal.
3. The publisher provides legal support to the journal if necessary.
4. The publisher provides for the timely release of futures issues of the journal.
5. The publisher publishes changes, explanations, and recalls articles that have been identified to contain scientific misconduct and or critical errors.

The responsibility of the editor-in-chief of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editor-in-chief is responsible for making a decision which of submitted papers are to be published in the journal. This decision always must be based on the examination of paper reliability and its importance for scientists and readers. The editor-in-chief may be guided by methodical recommendation elaborated by the editorial board of the journal. He also may take into account legal requirements, such as exclusion of libel, infringement of copyright and plagiarism. When making decision on the publication, the editor-in-chief may consult with the members of editorial board, reviewers.
2. The editor-in-chief evaluates submitted papers by the intellectual content, regardless of the race, sex, sexual preference, religion, ethnic origins, citizenship and political views of the author.
3. The editor-in-chief, editorial staff, members of the editorial board must not disclose information on the submitted manuscript to the third person except for the author, reviewers, potential reviewers, and the publisher.
4. The information contained in the submitted paper cannot be used in the paper of the editor-in-chief, members of the editorial board without author's written permission. Confidential information or ideas obtained during review must be kept in secret and must not be used for self-profit.
5. The editor-in-chief should not review the paper if there is a conflict of the interests evolving from competition, cooperation or other relations with someone from the authors, companies and organizations which are related to the paper.
6. The editor-in-chief should ask all authors to present information on the certain competitive interests and publish corrections if the conflict of the interests has been revealed after the publication. If necessary another appropriate action such as publication of disproof or expression of a concern can be performed.
7. The editor-in-chief should take reasoned and prompt measures if he gets complaints of ethnic character in respect to the submitted manuscript or issued paper, contacting with the editors and publisher.

Complaints and appeals handling

In the case of incoming complaints and appeals a commission is formed. The commission can consist of the publisher, the editor-in-chief, deputy editor-in-chief, members of editorial council, authors and specialists which are competent in the considering subjects.

An investigation is held and the results of it are reported to all interested parties. According to laws, if it is necessary, the materials are delivered to competent state bodies.

Policy of disclosure and conflicts of interest /competing interests

Unpublished data from manuscripts submitted for consideration can not be used for personal research without the expressed written consent of the author.

Information or ideas obtained through peer review and related activities, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

Ethical oversight of the published materials

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

Derivation and plagiarism

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

Intellectual property

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

- support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
- cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

Preprint and postprint policy

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.

On the procedure in case of abusive practice (infringement)

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.

Policy of using generative artificial intelligence

Generative artificial intelligence (AI) and artificial intelligence-based technologies can be used to improve the language of a manuscript, such as grammar, syntax, and spelling. In this case, no statements about the use of AI are required from the author(s).

In all other cases, the authors should disclose the use of generative AI technologies in the "Additional information" section of their manuscript. The application may be as follows: "During the preparation of the manuscript, we used [the name of the tool/service] for [a reason]. After using this tool/service, we have reviewed and edited the content as necessary and assume full responsibility for the content of the published article." This means that the use of AI-generated technologies should be accompanied by human supervision and control. Authors should carefully check and edit the results obtained, as the text generated by AI can often be erroneous, incomplete, or biased. The authors are fully responsible for the content of their work.

If the manuscript contains images created or modified using generative AI or AI-supported tools, the authors should report this in the "Additional Information" section. They should provide a detailed description of when and how these tools were used. In addition, the authors must confirm that they have obtained all permissions to use the materials.

The authorship of a manuscript can only be attributed to a person. AI and AI-enabled technologies cannot be listed as author(s) or co-author(s) due to their inability to meet the criteria of authorship. They cannot take responsibility for the work, approve publication, manage copyrights, or resolve issues related to conflicts of interest.

Personal Data Processing Policy (for Authors, Reviewers, and Readers)

The Editorial Board of the Electronic Edition «Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet Journal» has established its policy regarding the processing of personal data of **authors, editors, reviewers, and readers** in accordance with the Provisions of the Federal Law of the Russian Federation dated July 27, 2006, No. 152-Federal Law «On Personal Data» (hereinafter referred to as the «Personal Data Law»). This policy is aimed to ensure the protection of human and civil rights and freedoms during the personal data processing, including the protection of the right to privacy, personal privacy, and family confidentiality.

More detailed information is available on the website of the [Electronic Edition «Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet Journal»](http://nanobuild.ru).

ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике ([Committee on Publication Ethics](#)), Великобритания, [издательства Elsevier](#) (Нидерланды) и других зарубежных редакторских ассоциаций и информационных систем, а также [Декларация «Этические принципы научных публикаций»](#), принятая Ассоциацией научных редакторов и издателей (Россия).

Ответственность авторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Автор отправляет на рассмотрение статью, материалы которой ранее не были опубликованы. Если статья основана на ранее опубликованных материалах не статейного характера или материалы представлены в Интернете, следует уведомить об этом редакцию журнала.
2. Автор не отправляет на рассмотрение одну статью в разные журналы.
3. Все соавторы согласны на представление статьи в журнал.
4. Автор уведомляет редакцию о потенциальном конфликте интересов. Об отсутствии конфликта интересов автор указывает в статье – «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».
5. Автор предпринимает необходимые меры, чтобы убедиться в корректности представленных в статье цитирований.
6. В список авторов включаются только лица, внесшие значительный вклад в проведение исследования.
7. Автор корректно цитирует свои предыдущие работы и избегает самоплагиата в рукописи и искусственно-го увеличения объема публикаций (salami-slicing).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самостоятельно и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе [Антиплагиат](#) по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторы.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.

Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.
2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.
3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.
Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».
4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.
5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.
6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.
7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.
2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.
3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.
4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.
5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлекцией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлекции, рецензентами.
2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.
3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлекции не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.
4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлекции без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.
5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.
6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.
7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.

Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и апелляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редколлегии, организовав немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

Заимствования и плагиат

Редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы [Антиплагиат](#). В случае обнаружения многочисленных заимствований редакция действует в соответствии с правилами [COPE](#).

Интеллектуальная собственность

Редакторы должны внимательно относиться к вопросам, касающимся интеллектуальной собственности, и взаимодействовать с издателем при урегулировании случаев возможных нарушений законов и соглашений об охране интеллектуальной собственности.

Редакторы, кроме применения инструментов обнаружения плагиата, могут также:

- поддерживать авторов, чье авторское право было нарушено, или тех, кто стал жертвой плагиата;
- быть готовыми к совместной работе с издателем по защите авторских прав и к преследованию нарушителей (например, путём подачи запросов для отзыва статей или удаления материалов с веб-сайтов).

Обсуждение работ, опубликованных в журнале. Исправления после публикаций

Редакторы должны быть открытыми для исследований, которые оспаривают предыдущие работы, опубликованные в журнале; поощрять и с готовностью рассматривать обоснованную критику работ, публикуемых в их журнале.

Авторы критикуемых материалов должны иметь возможность ответить на критику. Работы, сообщающие только об отрицательных результатах, также могут публиковаться.

Политика размещения препринтов и постпринтов

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке на опубликованную в журнале «Нанотехнологии в строительстве» статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

О процедурах в случае злоупотреблений (нарушений)

Издатель, главный редактор, каждый сотрудник редакции, член редакционной коллегии, автор, рецензент и читатель обязаны соблюдать этику научных публикаций в журнале действующих законов, правил или положений и обязуются сообщать о любых известных случаях уже совершенного или потенциального злоупотребления (нарушения).

Редакцией журнала незамедлительно проводится расследование по всем сообщениям о злоупотреблениях (нарушениях) и, если информация подтверждается, принимаются меры по устранению злоупотреблений (нарушений). Если это требуется в соответствии с законодательством, материалы передаются в соответствующие государственные органы.

На все претензии авторов редакция предоставляет развернутые и обоснованные ответы, прилагая все усилия для разрешения конфликтных ситуаций.

Политика использования генеративного искусственного интеллекта

Генеративный искусственный интеллект (ИИ) и технологии, основанные на искусственном интеллекте, могут быть использованы для улучшения языка рукописи, включая грамматику, синтаксис и орфографию. В этом случае со стороны автора(ов) не требуется никаких заявлений об использовании ИИ.

Во всех остальных случаях авторы должны заявить об использовании технологий генеративного ИИ в разделе «Дополнительная информация». Заявление может быть следующим: «Во время подготовки этой статьи мы использовали [название инструмента/сервиса] по [причине]. После использования этого инструмента/сервиса мы пересмотрели и отредактировали контент по мере необходимости и берем на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи». Это означает, что использование технологий ИИ должно сопровождаться человеческим надзором и контролем. Авторы должны тщательно проверять и редактировать полученные результаты, так как текст, сгенерированный ИИ, часто может быть ошибочным, неполным или не объективным. Авторы несут полную ответственность за содержание своей работы.

Если рукопись содержит изображения, созданные или измененные с помощью генеративного ИИ или инструментов, поддерживаемых ИИ, авторы должны сообщить об этом в разделе «Дополнительная информация», предоставив подробное описание того, когда и как были использованы эти инструменты. Кроме того, авторы должны подтвердить, что они получили все необходимые права на использование таких материалов.

Авторство рукописи может быть приписано только человеку. ИИ и технологии с поддержкой ИИ не могут быть указаны в качестве автора(ов) или соавтора(ов) из-за их неспособности соответствовать критериям авторства: они не могут взять на себя ответственность за работу, дать согласие на публикацию, управлять авторскими правами или решать вопросы, связанные с конфликтом интересов.

Политика обработки персональных данных (авторов, рецензентов, читателей)

Политика редакции электронного издания «Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал» в отношении обработки персональных данных **авторов, редакторов, рецензентов, читателей** определена в соответствии с положениями Федерального закона Российской Федерации от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ «О персональных данных» (далее – Закон о персональных данных) в целях обеспечения защиты прав и свобод человека и гражданина при обработке его персональных данных, в том числе защиты прав на неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну.

[Более подробная информация размещена на сайте электронного издания «Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал».](#)

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 / Sources of funding for scientific research: (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 nano-modifiers 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 CREDITS System. *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, Russian Federation, 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>

Please note! Manuscripts without an ORCID will not be accepted. If the author does not have an ORCID, they must register at <https://orcid.org/> and fill in the required information.

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 / Sources of funding for scientific research:** (In English)**For citation:** (In Russian)**Example.**

Для цитирования: Низин Д.Р., Низина Т.А., Спиринов 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 / Sources of funding for scientific research: (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, Российская Федерация, 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 nanoиндустрии;
- 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 nanoиндустрии.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с 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 7.0.110-2025)

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.н.*)

* 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 (**I**ntroduction, **M**ethods and **M**aterials, **R**esults, **D**iscussion, **C**onclusion), 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 / Sources of funding for scientific research: (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. Pisarenko Zh.V., Simchenko N.A., Ivanov L.A., Xie W., Nasyrova G.A. Prerequisites, opportunities and risks for the future development of nanotechnology at the global level. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(6):775–786. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786>. – EDN: RBJCOI.

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом. 2. В материалах, опубликованных только на русском языке, указывается (In Russ.). 3. Необходимо указывать EDN (при наличии) – информацию можно найти по ссылке – [Идентификация библиографических записей на eLIBRARY.RU](https://eLIBRARY.RU)

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, Russian Federation, 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>

Внимание! Без указания ORCID рукопись не принимается. Если у автора ORCID отсутствует, необходимо зарегистрироваться на сайте <https://orcid.org/>, заполнив требуемые данные.

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 / Источники финансирования научной работы: (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 / Sources of funding for scientific research: (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. Писаренко Ж.В., Симченко Н.А., Иванов Л.А., Се В., Насырова Г.А. Предпосылки, возможности и риски перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):775–786. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786>. – EDN: RBJCOI.

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом. 2. Необходимо указывать EDN (при наличии) – информацию можно найти по ссылке – [Идентификация библиографических записей на eLIBRARY.RU](#)

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, Российская Федерация, 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.

Заключение Лицензионного договора

В случае принятия статьи к публикации между издателем и автором(ами) заключается Лицензионный договор (редакция высылает авторам образец договора).