

ISSN 2500-1477
2025. Volume 13
Issue 4 (49)

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

RIO R
SCIENCE

DOI 10.12737/issn.2308-0191

ISSN 2500-1477
DOI 10.29039/2308-0191

Том 13
Выпуск 4(49)
Декабрь 2025

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (с 1 ноября 2019 г.)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Лапидус Азарий Абрамович — Московский государственный строительный университет (кафедра «Технологии и организация строительного производства», заведующий кафедрой), доктор технических наук, Заслуженный строитель Российской Федерации, Член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, Почётный строитель России, Почётный строитель города Москвы, Почетный работник Высшего профессионального образования РФ, Почётный наставник Министерства науки и высшего образования РФ, профессор (Москва, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Адамцевич Любовь Андреевна — Московский государственный строительный университет (кафедра Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, доцент), кандидат технических наук, доцент (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ *

Маилян Левон Рафаэлович — Донской государственный технический университет (кафедра «Строительства уникальных зданий и сооружений», профессор), доктор технических наук, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), профессор (Ростов-на-Дону, Россия)

Ильинская Светлана Валерьевна — Государственный университет по землеустройству (кафедра «Архитектура», заведующая кафедрой), доктор архитектуры, кандидат искусствоведения, член Союза архитекторов РФ, член Союза дизайнеров Москвы. Советник Российской Академии Архитектуры и Строительных Наук (РААСН), член ЕКОВАСТ (Европейская комиссия по малым городам и поселениям России), академик Академии Профессиональных образований (Москва, Россия)

Самченко Светлана Васильевна — Московский государственный строительный университет (кафедра строительного материаловедения, заведующий кафедрой), доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

* Полный список членов редакционного совета можно найти на <https://conarc.ru>.

Издатель: ООО «Издательский Центр РИОР»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В. info@riogr.ru; <https://riogrpub.com>
Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов.
Перепечатка материалов допускается с письменного разрешения редакции.
При цитировании ссылка на журнал «СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА» обязательна.
Информация о публикации: На 2026 г. запланирован выход тома 14 (4 выпуска).
Размещение рекламы: Если вы заинтересованы в размещении рекламы в нашем журнале, пишите на info@riogr.ru.
Информация для авторов: Подробные инструкции по подготовке и отсылке рукописей можно найти на <https://conarc.ru>. Присланные рукописи не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право самостоятельно снабжать авторские материалы иллюстрациями, менять заголовки, сокращать тексты и вносить в рукописи необходимую стилистическую правку без согласования с авторами. Отсыпка материалов на адрес редакции означает согласие авторов принять ее требования.

Электронная версия: Электронные версии отдельных статей можно найти на <https://conarc.ru>.

Заказы, жалобы и запросы: Пишите на info@riogr.ru или звоните +7(495)280-38-67.

Письма и материалы для публикации высыпать по адресу:

127282, Россия, Москва, ул. Полярная, д. 31В

(ИЦ РИОР) или на e-mail: info@riogr.ru.

© ООО «Издательский Центр РИОР», 2025.



ISSN 2500-1477
DOI 10.29039/2308-0191
Volume 13
Issue 4 (49)
December 2025

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Lapidus Azariy — Moscow State University of Civil Engineering (Department of Technology and Organization of Construction Production, Head of the Department), doctor of technical sciences, professor (Moscow, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Adamcevich Lyubov' — Moscow State University of Civil Engineering (Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, Associate professor), candidate of technical sciences, associate professor (Moscow, Russia)

EDITORIAL BOARD *

Mailyan Levon — Don State Technical University (Department of Construction of Unique Buildings and Structures, Professor), doctor of technical sciences, professor (Rostov-on-Don, Russia)

Il'vickaya Svetlana — State University of Land Use Planning (Department of Architectura, Head of the Department), doctor of architecture, candidate of art criticism, professor (Moscow, Russia)

Samchenko Svetlana — Moscow State University of Civil Engineering (Department of Construction Materials Science, Head of the Department), doctor of technical sciences, professor (Moscow, Russia)

Verzhbovskiy Gennadiy — Don State Technical University (Faculty «Industrial and Civil Engineering», Dean of the Faculty), doctor of technical sciences, professor (Rostov-on-Don, Russia)

Leonovich Sergey Nikolaevich — Belarusian National Technical University (Department of Building Materials and Construction Technologies, Head of the Department), doctor of technical sciences, professor (Minsk, Republic of Belarus)

Pischilina Viktoriya — Don State Technical University (Department «Architectural Restoration, Reconstruction and History of Architecture», Head of the Department), doctor of architecture, professor (Rostov-on-Don, Russia)

Korol Elena — Moscow State University of Civil Engineering (Housing and Communal Complex Department, Head of Department), doctor of technical science, professor (Moscow, Russia)

Zheleznov Maksim — Moscow State University of Civil Engineering (Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, Professor), doctor of technical sciences, associate professor (Moscow, Russia)

Kalugina Ol'ga — Russian State University for the Humanities (Department of Cinema and Contemporary Art, Chief Researcher), doctor of art criticism (Moscow, Russia)

Orlov Evgeniy — Moscow State University of Civil Engineering (Associate Professor), candidate of technical sciences, associate professor (Moscow, Russia)

Piotrovich Aleksey Anatol'evich — Far Eastern State Transport University (Professor), doctor of technical sciences, associate professor (Khabarovsk, Russia)

Prajapati Parth — Pandit Deendayal Energy University (Department of Mechanical Engineering, Assistant Professor) (Gandhinagar, India)

* The full list of members of the editorial board can be found at <https://conarc.ru>.

Publishing office: RIOR. 127282, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31B.
info@riorp.ru; <https://riorpublisher.com>

The opinion of the editorial board may not coincide with the opinion of the authors of publications.

Reprinting of materials is allowed with the written permission of the publisher.

While quoting the reference to the journal "CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE" is required.

Publication information: CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE. For 2026, volume 14 (4 issues) is scheduled for publication.

Subscription information: Please contact +7(495)280-38-67.

Subscriptions are accepted on a prepaid basis only and are entered on a calendar year basis. Issues are sent by standard mail. Claims for missing issues are accepted within 6 months of the day of dispatch.

Advertising information: If you are interested in advertising or other commercial opportunities please e-mail: info@riorp.ru.

Information for the authors: The detailed instructions on the preparation and submission of the manuscript can be found at <https://conarc.ru>. Submitted manuscripts will not be returned. The editors reserve the right to supply materials with illustrations, to change titles, cut texts and make the necessary restyling in manuscripts without the consent of the authors. Submission of materials indicates that the author accepts the demands of the publisher.

"CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE" has no page charges.

Electronic edition: Electronic versions of separate articles can be found at <https://conarc.ru>.

Orders, claims, and journal enquiries:

Please contact info@riorp.ru or +7(495)280-38-67.

© RIOR, 2025.



СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 13 (2025, ВЫП. 4(49))

ОТ РЕДАКЦИИ

- C0007 РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ Д.Т.Н., ПРОФЕССОРА СВАТОВСКОЙ Л.Б.
В ПЕТЕРБУРГСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I
*Сычева Анастасия Максимовна,
Сычев Максим Максимович
Шеринева Мария Владимировна,
Масленникова Людмила Леонидовна,*

2.1.5. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

- C0008 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ
ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
СТАЛЕФИБРОБЕТОНА
*Абу-Хасан Махмуд Самиевич,
Домбровский Илья Геннадьевич,
Маркова Дарья Алексеевна*
- C0009 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД
КАК СЫРЬЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ
Русанова Екатерина Владимировна
- C0010 НАУЧНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ БИОДЕГРАДАЦИИ
БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
*Байдарашвили Марина Михайловна,
Богачева Инна Валерьевна*
- C0011 ПЕРЕХОД НА МНОГОУРОВНЕВУЮ СИСТЕМУ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ
БЕТОНА В ОТВЕТСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
*Беленцов Юрий Алексеевич,
Черепанова Дария Алексеевна*
- C0012 ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ МАТРИЦЫ
НА ПРОЧНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ОБЫЧНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ
*Каменев Юрий Александрович,
Павлюк Александр Юрьевич,
Нестеров Олег Сергеевич,
Карасев Сергей Юрьевич*

- C0013 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАТЛИВОЙ СТРУКТУРЫ МАТРИЦЫ БЕТОНА
*Каменев Юрий Александрович,
Павлюк Александр Юрьевич,
Нестеров Олег Сергеевич,
Карасев Сергей Юрьевич*
- C0014 ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ
С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛОЖЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ
*Ковалев Федор Евгеньевич,
Зарин Сергей Владимирович,
Селиверстов Николай Александрович*
- C0015 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО
ПОДБАЛЛАСТНОГО СЛОЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ В КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ
*Колос Алексей Федорович,
Черняева Виктория Андреевна,
Шехтман Евгений Иосифович,
Соколов Леонид Константинович*
- C0016 ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
*Кузьмин Евгений Олегович,
Сапронова Жанна Ануаровна,
Лукьяненко Никита Олегович*
- C0017 СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ФАСАДНОЙ ОТДЕЛКИ
НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВЫХ ШТУКАТУРОК
*Майер Роман Алексеевич,
Шангина Нина Николаевна,
Харитонов Алексей Михайлович*
- C0018 ПРЕИМУЩЕСТВА УТИЛИЗАЦИИ ТОРФЯНОЙ ЗОЛЫ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ
*Сахарова Антонина Сергеевна,
Спрыжкова Юлия Игоревна,
Рожкова Инна Евгеньевна*
- C0019 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНОБЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ УКОРОЧЕННОГО
УЛАВЛИВАЮЩЕГО ТУПИКА
*Селезнев Алексей Викторович,
Романов Андрей Валерьевич*
- C0020 ФАКТОРЫ ПОВЫШЕНИЯ РАННЕЙ ПРОЧНОСТИ ШЛАКОВЫХ БЕТОНОВ
С ДОБАВКАМИ
*Сметанин Алексей Алексеевич,
Нуриев Али Гасаналиевич,
Гиндуллин Тимур Русланович*

C0021 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ДОЛГОВЕЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ
ДЛЯ ЛЮКОВ СМОТРОВЫХ КОЛОДЦЕВ
Смирнова Ольга Михайловна

C0022 МНОГОСЛОЙНАЯ ЗАЩИТНАЯ КОНСТРУКЦИЯ,
НАПЕЧАТАННАЯ НА СТРОИТЕЛЬНОМ 3D-ПРИНТЕРЕ.
ФИЗИКА ПРОХОЖДЕНИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ НЕЁ
*Сычева Анастасия Максимовна,
Нестеров Олег Сергеевич,
Шашков Алексей Иванович,
Морозов Иван Сергеевич*

C0023 ЖАРОСТОЙКИЙ ПЕНОБЕТОН С РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫМИ
СВОЙСТВАМИ
*Сычева Анастасия Максимовна,
Титова Тамила Семеновна,
Майер Виктория Александровна*

C0024 СИНТЕЗ ЖАРОСТОЙКОГО ПЕНОБЕТОНА НА ОСНОВЕ
ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ
ОБЪЕКТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
*Сычева Анастасия Максимовна,
Рябова Светлана Сергеевна*

C0025 ДОРОЖНЫЙ БЕТОН НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ – ИНТЕГРАЦИЯ
САМОУПЛОТНЕНИЯ И ПОВЫШЕННОЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ
СТОЙКОСТИ
*Титова Тамила Семеновна,
Соловьева Валентина Яковлевна,
Степанова Ирина Витальевна*

C0026 СИНТЕЗ ПЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЗОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ
КИСЛОТЫ ДЛЯ ГРАЖДАНСКОГО И ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
*Шашков Алексей Иванович,
Сычева Анастасия Максимовна,
Нестеров Олег Сергеевич*

CONTENTS OF VOLUME 13 (2025, ISSUES 4(49))

EDITORIAL

- C0007 DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC SCHOOL OF DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES, PROFESSOR L.B. SVATOVSKAYA AT THE ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF RAILWAYS OF EMPEROR ALEXANDER I
*Sycheva Anastasia Maksimovna,
Sychev Maxim Maximovich
Shershneva Maria Vladimirovna,
Maslennikova Lyudmila Leonidovna,*

2.1.5. BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL SCIENCES)

- C0008 TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF ELEMENTS OF HYBRID STRUCTURAL COATINGS BASED ON STEEL FIBER CONCRETE
*Abu-Khasan MaKhmud Samievich,
Dombrovskiy Ilya Gennadievich,
Markova Darya Alekseevna*
- C0009 RESEARCH OF ASH FROM THE INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE AS A RAW MATERIAL FOR THE CREATION OF INNOVATIVE BUILDING MATERIALS
Rusanova Ekaterina Vladimirovna
- C0010 TRANSITION TO A MULTI-LEVEL SYSTEM FOR MONITORING CONCRETE STRENGTH IN CRITICAL STRUCTURES
*Baydarashvili Marina Michaylovna,
Bogacheva Inna Valerievna*
- C0011 TRANSITION TO A MULTI-LEVEL SYSTEM FOR MONITORING CONCRETE STRENGTH IN CRITICAL STRUCTURES
*Belentsov Yuri Alekseevich,
Cherepanova Daria Alekseevna*
- C0012 THE EFFECT OF THE CEMENT-SAND MATRIX STRUCTURE ON THE STRENGTH OF PROTECTIVE STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF CONVENTIONAL WEAPONS
*Kamenev Yuri Alexandrovich,
Pavlyuk Alexander Yurievich,
Nesterov Oleg Sergeevich,
Karasev Sergey Yurievich*
- C0013 MODELING OF THE COMPLIANT STRUCTURE OF CONCRETE MATRIX
*Kamenev Yuri Alexandrovich,
Pavlyuk Alexander Yurievich,
Nesterov Oleg Sergeevich,
Karasev Sergey Yurievich*

C0014 ESTIMATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF EXISTING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY VIBRATION METHOD WITH DETERMINATION OF THE NEUTRAL LINE POSITION

*Kovalev Fyodor Evgenievich,
Sarin Sergey Vladimirovich,
Seliverstov Nikolai Alexandrovich*

C0015 STUDY OF THE EFFECT OF ASPHALT CONCRETE SUBBALLAST LAYER ON THE ACCUMULATION OF RESIDUAL DEFORMATIONS IN THE RAILWAY TRACK STRUCTURE

*Kolos Alexey Fedorovich,
Chernyaeva Victoria Andreyevna,
Shekhtman Evgeny Iosifovich,
Sokolov Leonid Konstantinovich*

C0016 THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF METALLURGICAL PRODUCTION

*Kuzmin Yevgeniy Olegovich,
Sapronova Zhanna Anuarovna,
Lukyanenko Nikita Olegovich*

C0017 MODERN FACADE FINISHING SYSTEM BASED ON LIME PLASTERS

*Mayer Roman Alekseevich,
Shangina Nina Nikolaevna,
Kharitonov Alexey Mikhailovich*

C0018 ADVANTAGES OF RECYCLING PEAT ASH IN THE PRODUCTION OF BUILDING CERAMICS

*Sakharova Antonina Sergeevna,
Spryzhkova Yulia Igorevna,
Rozhkova Inna Evgenievna*

C0019 USING FOAM CONCRETE IN THE DESIGN OF A SHORTENED RAILWAY CAPTURE DEAD END

*Seleznev Alexey Viktorovich,
Romanov Andrey Valerievich*

C0020 FACTORS FOR INCREASING THE EARLY STRENGTH OF SLAG CONCRETES WITH ADDITIVES

*Smetanin Alexey Alekseevich,
Nuriev Ali Gasanalievich,
Gindullin Timur Ruslanovich*

C0021 ENGINEERING OF COMPOSITIONS OF DURABLE CEMENT FIBER COMPOSITES FOR MANHOLES

Smirnova Olga Mikhailovna

C0022 MULTI-LAYER PROTECTIVE STRUCTURE PRINTED ON A CONSTRUCTION 3D PRINTER. PHYSICS OF ELASTIC WAVE PASSING THROUGH IT

*Sycheva Anastasiia Maksimovna,
Nesterov Oleg Sergeevich,
Shashkov Aleksei Ivanovich*

C0023 HEAT-RESISTANT FOAM CONCRETE WITH RADIATION-SHIELDING PROPERTIES

*Sycheva Anastasiia Maksimovna,
Titova Tamila Semenovna,
Maier Viktoriia Alexandrovna*

C0024 SYNTHESIS OF REFRACTORY FOAM CONCRETE BASED ON PORTLAND CEMENT FOR USE IN STRUCTURES OF SPECIAL CONSTRUCTION FACILITIES

*Anastasia Maximovna Sycheva,
Ryabova Svetlana Sergeevna*

C0025 NEXT-GENERATION ROAD CONCRETE – INTEGRATION OF SELF-COMPACTING AND INCREASED PHYSICAL AND MECHANICAL RESISTANCE

*Titova Tamila Semenovna,
Solovieva Valentina Yakovlevna,
Stepanova Irina Vitalievna*

C0026 SYNTHESIS OF A SILICA SOL-BASED FOAM MATERIAL FOR CIVIL AND MILITARY APPLICATIONS

*Shashkov Aleksei Ivanovich,
Sycheva Anastasiia Maksimovna,
Nesterov Oleg Sergeevich*

ОТ РЕДАКЦИИ

Развитие научной школы д. т. н., профессора Сватовской Л. Б. в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I

Номер статьи: С0007

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,
Почетный работник высшего профессионального образования РФ,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»,
Санкт-Петербург, Россия
SPIN: 9093-5541
amsychova@yandex.ru

Сычев Максим Максимович

д-р техн. наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
зав. кафедрой «Теоретические основы материаловедения»
Санкт-Петербург, Россия
SPIN: 6177-9220
msychov@yahoo.com

Шершнева Мария Владимировна

д-р техн. наук,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание»,
Санкт-Петербург, Россия
SPIN: 7556-2741
scherschneva@rambler.ru

Масленникова Людмила Леонидовна

д-р техн. наук,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание»,
Санкт-Петербург, Россия
SPIN: 6606-0945
llmaslennikova@yandex.ru

Статья получена: 26.11.2025. Одобрена: 15.12.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Development of the scientific school of Doctor of Technical Sciences, Professor L.B. Svatovskaya at the St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I

Sycheva Anastasia Maksimovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation,
St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I,
Head of the Department "Building Materials and Technologies",
St. Petersburg, Russia
amsychova@yandex.ru

Sychev Maxim Maximovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
St. Petersburg State Institute of Technology,
Head of the Department "Theoretical Foundations of Materials Science"
St. Petersburg, Russia
msychov@yahoo.com

Shershneva Maria Vladimirovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I,
Professor, Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences
St. Petersburg, Russia
scherschneva@rambler.ru

Maslenikova Lyudmila Leonidovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I,
Professor, Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences
St. Petersburg, Russia
llmaslenikova@yandex.ru

Введение

«Истина открывается в тиши тем, кто её разыскивает»
Д. И. Менделеев

Это высказывание Дмитрия Ивановича Менделеева передает особый смысл научной деятельности д.т.н., профессора Ларисы Борисовны Сватовской, которая всегда искала истину — научную, духовную, человеческую, междисциплинарную и находила ее!

Эта истина отражается в ее работах и работах ее учеников, в новых законах и взаимосвязях процессов получения таких защитных материалов, которые можно отнести к «сквозным», то есть применимым в различных отраслях, например, в строительстве и геоэкологии, в каждой из которых они выполняют свою функцию.

Научная школа является продолжением знаний науки о материалах, которое заложил в Университете Д. И. Менделеев начиная с 1861 года.

Поиск духовной истины привел Ларису Борисовну к идеи строительства на территории университета Храма-Часовни, которую она реализовала и построила Храм во имя Святого

Благоверного Великого князя Александра Невского; освящение Храма-Часовни прошло 1 ноября 2000 года.



22 октября 2025 года в Петербургском государственном университете путем сообщения Императора Александра I прошла Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию профессора Ларисы Борисовны Сватовской «ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКОЛОГИИ». Данный номер журнала «Строительство и архитектура» собрал материалы лучших докладов этой конференции.

I направление научной школы – строительное материаловедение

Одной из основных идей научной школы Сватовской Л. Б. является поиск взаимосвязи энергетических и электронных уровней строения веществ со свойствами композиционных материалов для строительства и защиты окружающей среды. Другими словами, поиску ответа на вопрос, как микромир может

управлять макропроцессами получения материалов с заданными свойствами для строительства и экологии с целью противодействия нагрузкам и воздействиям на эти материалы.

Такой подход базируется на двух основных аспектах твердеющего композиционного материала из силикатной или фосфатной матрицы, а также из глиносодержащих веществ.

На возможной трансформации выделяющейся в ходе реакции самопроизвольного твердения энергии в механическую энергию за счет образования новых химических связей или замене части энергетических затрат на обжиг материала.

На влиянии электронного строения вещества на механизмы протекания реакций твердения, образования новых контактов и свойств композиционных материалов.

Основные работы, в которых отражены новые представления научной школы Л. Б. Сватовской принадлежат ее ученикам:

- Смирнова Т. В. «Получение и использование для строительства активированных нефелиновых вяжущих».
- Умань Н. И. «Активированное твердение бетонов с учетом энергетики гидратационных процессов».
- Соловьёва В. Я. «Разработка экозащитных материалов для строительства с учетом природы твердения вяжущих систем».
- Шангина Н. Н. «Прогнозирование физико-механических характеристик бетонов с учетом донорно-акцепторных свойств поверхности наполнителей и заполнителей».
- Масленникова Л. Л. «Получение строительного кирпича с улучшенными эксплуатационными свойствами и широкой гаммой цветов на базе техногенного сырья».
- Латутова М. Н. «Получение и свойства новых алюмофосфатных декоративных и строительных экоматериалов на основе природного и техногенного сырья».
- Масленникова Л. Л. «Разработка и внедрение керамических материалов с прогнозируемыми свойствами и учетом особенностей природы вводимого техногенного сырья».
- Сычева А. М. «Добавки некоторых новых типов для твердения цементных смесей при пониженных и отрицательных температурах».

- Чернаков В. А. «Получение монолитного пенобетона улучшенных тепло- и механофизических свойств с учетом особенностей природы заполнителя».
- Хитров А. В. «Получение современных автоклавных пенобетонов с учетом природы вводимых строительных пен».
- Чернаков В. А. «Закономерности изменения основных тепло- и механофизических свойств пеноматериалов в зависимости от композиционной цементной основы».
- Абу-Хасан М. С. «Управление свойствами керамического кирпича на базе техногенного отходителя с учетом представлений о природе контактных фаз».
- Хитров А. В. «Технология и свойства пенобетона с учетом природы вводимой пены».
- Шангин В. Ю. «Закономерности изменения свойств тонкослойных цементных композиций с учетом природы составляющих твердых фаз».

Благодаря идеям Л. Б. Сватовской о взаимосвязи электронного строения элемента катиона основной фазы и его принадлежности к электронным семействам в таблице Д. И. Менделеева с эксплуатационными свойствами твердых веществ, была разработана совместно с Масленниковой Л. Л. классификация твердых минеральных отходов (s-, p-, d-техногенное сырье) с прогнозом их утилизации и влияния на эксплуатационные свойства керамических строительных материалов с температурой обжига до 1000 °C.

По данной классификации ввод s-техногенного сырья в керамическую шихту позволит осветлить красножгущиеся глины и улучшить теплотехнические характеристики керамических изделий, а ввод p-, d- техногенного сырья повысить физико-механические характеристики — прочностные, морозостойкость.

Представленные закономерности и достоверность классификации были с успехом подтверждены диссертационными работами Абу-Хасан М. С. (использование p-, d-техногенного сырья — отсева баластного щебня, купершлака для повышения эксплуатационных свойств кирпича), Славиной А. М. (s- техногенное сырьё — отходы боя пенобетона для получения эффективного кирпича), а также ВКР аспирантки Михайловой К. В., НКР магистрантов Тюриной Ю. Г., Юрченко А. А., Грациановой Е. М. (получение лицевого кирпича светлого тона с уменьшенным коэффициентом теплопроводности с использованием s-техногенного сырья).

Некоторые направления дальнейшего развития научной школы:

- Поиск точной зависимости прочности материала и свободной энергией процесса, G^0_{298} , способной превратиться в полезную работу, т.е. извлечение максимального КПД превращения одного вида энергии в другой.
- Кинетический аспект долговечности материала. Для замедления химического взаимодействия материала с окружающей средой с его последующим разрушением следует повысить энергию активации процесса взаимодействия материала — окружающая среда, что может быть достигнуто с помощью отрицательного катализа.
- Прогноз свойств композиционных материалов с учетом термодинамики открытых систем. Вяжущие системы проявляют признаки самоорганизации, но модель развития таких открытых систем не изучена.

II направление научной школы — геоэкологическое материаловедение

Историю развития научных знаний в области геоэкологии можно условно разделить на четыре этапа. Первый этап связан с накоплением и осмыслением существующих концепций, второй — с объединением знаний экологии и географии, третий этап заключался в отраслевых и комплексных геоэкологических исследованиях для решения глобальных и региональных экологических проблем, четвертый этап предполагает обобщение геоэкологических знаний, развитие методологии геоэкологии, возникновение и развитие смежных наук, например, таких как геоэкохимия.

На каждом этапе развития геоэкологии, можно выделить группу ученых, которые вносили свой вклад в получение и развитие новых знаний. Несомненно, именно к таким ученым относится к.х.н., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой «Инженерная химия и

естествознание» ПГУПС Сватовская Лариса Борисовна, которая, с конца прошлого века, формировалась и развивала научную геоэкологическую школу ПГУПС.

Впервые на основе фундаментальных представлений о строении, составе и свойствах минеральных отходов и загрязнителей окружающей среды были разработаны основные принципы геоэкозащитных технологий, соответствующие концепции устойчивого развития.

До начала третьего тысячелетия среди научных специальностей, связанных с геоэкологией можно выделить специальность «Охрана окружающей среды». Именно по этой специальности под руководством Сватовской Л. Б. были написаны и защищены первые в ПГУПС кандидатские диссертации в области геоэкологии. К таким работам относятся «Применение некоторых техногенных продуктов с гидратационно-активными минералами как адсорбентов при защите окружающей среды» (Шершнева М. В.) [1], «Эффективная очистка загрязненных грунтов с использованием моющих средств» (Смирнов А. В.), «Разработка математической модели и методики расчета рассеяния вредного вещества в атмосферном воздухе от подвижных источников железнодорожного транспорта» (Филимонова Г. П.) [2, 3].

Обобщение и развитие полученных знаний были сделаны в первой в истории ПГУПС докторской диссертации по специальности «Экология» «Разработка новых подходов и решений, обеспечивающих снижение воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду» (Панин А. В.), научным консультантам которой была профессор Сватовская Л. Б. Так же при ее участии были написаны и защищены работы по экологии «Применение индикаторного метода для выбора компонентов экозащитных систем при очистке водных сред от ионов тяжелых металлов» (Байдарашвили М. М.) и «Применение термодинамического резерва для минимизации антропогенного воздействия обжиговых технологий производства строительных материалов на окружающую среду» (Зуева Н. А.).

Следующий этап развития геоэкологических знаний был связан с научным руководством и консультацией кандидатских и докторских диссертаций по специальности «Геоэкология»: «Комплексная технология очистки нефтезагрязненных металлических деталей и совместное использование некоторых отходов» (Макарова Е. И.), «Теория и практика утилизации отходов с учетом их энергосодержания и природы поверхности твердых фаз» (Якимова Н. И.), «Комплексная оценка влияния природозащитных технологий на геоэкологическую обстановку» (Титова Т. С.), «Научные основы технологий утилизации силикатсодержащих отходов» (Шершнева М. В.), «Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта» (Макарова Е. И.) [4, 5]. На протяжении многих лет Сватовская Л. Б. выступала в качестве оппонента при защите кандидатских и докторских диссертаций по экологии и геоэкологии.

Активная научная деятельность в области защиты и охраны окружающей среды ученых и специалистов кафедры под руководством профессора Сватовской Л. Б. привела к созданию учебных методических изданий по экологии и геоэкологии, в которых, используя фундаментальные представления в области термодинамики и химии, сформулированы основные принципы защиты природы от антропогенного воздействия. Учебные пособия были написаны для всех уровней высшего образования, включая бакалавриат, специалитет, магистратуру и аспирантуру. Вкладывая всю душу, Лариса Борисовна формировалась у читателей комплексный подход к защите окружающей среды, основанный в первую очередь на моральных принципах человечества, считая, что только такой подход позволит сохранить нашу планету для последующих поколений. Многие труды Сватовской Л.Б. переведены и опубликованы на английском языке, ее работы цитируются в нашей стране и за рубежом.

Последние годы научной деятельности Сватовской Л.Б. были посвящены развитию новой, смежной с геоэкологией наукой «Геоэкохимия». Одной из первых фундаментальных работ в этой области является монография «Введение в геоэкохимию детоксикации литосферы на базе особенностей процессов твердения вяжущих и искусственного камнеобразования», которая написана совместно с научным коллективом и учениками

кафедры «Инженерная химия и естествознание». На сегодняшний день, практически все ссылки в интернет-пространстве по запросу «Геоэкохимия» связаны с фамилией Сватовской Л. Б. и ее учеников.

Профессор, д. т. н. Сватовская Лариса Борисовна является основоположником современных знаний в области экологии, геоэкологии и геоэкохимии, направленных на разработку технологий минимизации, ликвидации и локализации загрязнений окружающей среды различной природы. Ее научные статьи многие десятилетия послужат основой для развития геоэкологических знаний во всем мире.

III направление научной школы — духовно-нравственное

Особой ветвью развития научной школы была идея возрождения и дальнейшего развития духовно-нравственной составляющей университета, которая реализовалась в строительстве Храма-Часовни имени святого Благоверного Князя Александра Невского (Рис. 1).



Рис. 1. Храм-часовня во имя Святого Благоверного князя Александра Невского

Ниже приведены цитаты Л. Б. Сватовской, которые она записала при подготовке книги «Храм-Часовня во имя святого благоверного князя Александра Невского при Петербургском государственном университете путей сообщения», посвященной строительству Храма-Часовни.

«В какой-то момент пришли сначала мысли, о потом уверенность в том, что Вера для человека в его Бытие — это Живая Вода для Души, что без Бога нет Человека, так же, как и без Человека нет Бога и что Единственный путь Души, который достоин прохождения — это путь к Богу. Отдельные мысли ученых и мыслителей, которые вызывают доверие своими достижениями и жизненным путем приведены в этом издании, так же, как и фамилии тех людей, благодаря вкладу которых осуществлялось строительство Храма. И те и другие — объединены в Духе. Может быть, лучшие о Вере сказал апостол Павел: «Вера — это осуществление желаемого и уверенность в невидимом» — такие слова могут поддержать

человека в его исканиях. Вера рождает и укрепляет Достоинство человека...; Вера приводит к независимости и свободе, на нее можно опереться, она придаёт мужество» [6]

Краткая история храмов университета

Первый домовой храм был построен при Институте инженеров путей сообщения Императора Александра I (архитекторы Жако и Антонелли). Теперь в этом зале находится один из залов библиотеки университета.

Освящен домовой храм был 6 марта 1829 г. епископом Ревельским Никанором.

Известно, что в домовом храме читал свои проповеди Иоан Кронштадтский. Он говорил преподавателям университета «Строя пути земные, не забывайте о путях духовных».

Домовой Храм был закрыт 28 октября 1918 г.

В 1999–2000 гг. по инициативе д. т. н., профессора Сватовской Ларисы Борисовны, заведующей кафедры «Инженерная химия и естествознание» и сотрудников университета, а также при поддержке ректора В. И. Ковалева во дворе университета был построен каменный Храм-Часовня в честь Святого Благоверного Великого Князя Александра Невского.

Проект Храма, увенчанного одной небольшой луковичной главкой, выполнил сотрудник университета — архитектор Ю. А. Никитин.

Освящен Храм-Часовня 1 ноября 2000 г. протоиереем Геннадием Бартовым.

При строительстве храма были использованы научные разработки кафедры «Инженерная химия и естествознание». Например, для кладки стен использовался специальный глазурованный кирпич, состав которого был разработан на кафедре. При укладке бетонного фундамента, которая происходила зимой при температуре минус 20 °С, использовались новые противоморозные добавки, изобретенные на кафедре. Иконы из безобжиговой смальты в виде мозаики украшают внутренние стены храма-часовни и так же изобретены учеными кафедры и выполнены ее художником Смирновой Э. В.

Настоятель университетской церкви протоиерей Николай Шорохов — вместе с храмом с момента его освящения.

На открытии выставки «Железнодорожные храмы Российской империи» он сказал: «Железная дорога — это микрокосм...Это огромная территория, которую пронизывают, как нити и опутывают железнодорожные пути. А путь к Богу — это сортировочная станция, где много разных путей. Можно отправиться по любому из них, но не все они ведут к Цели. Какой-то из них разобран, какой-то ведет в тупик... И только один из них ведет к Богу».

1 ноября 2025 года исполнилось 25 лет со дня освящения Храма-часовни. Храм освящен в честь Святого Благоверного Великого Князя Александра Невского, который был необыкновенно талантливым воином и защитником Руси, и святым, который силой своего духа защищал наше государство. Под этой духовной защитой находится и наш университет.

Заключение

Проработав в университете более 40 лет Лариса Борисовна Сватовская разработала и утвердила новые знания в строительном и экологическом материаловедении. Базируясь на них открылись новые научные школы, которые продолжают их развивать в других направлениях, например, в военном строительстве, атомной энергетике и др.

В образовательном процессе эти знания передаются студентам, как законы и правила, с помощью которых можно создавать долговечные материалы с заранее заданными свойствами; в 2025 году была разработана новая образовательная программа «Цифровое материаловедение», в дисциплинах которых эти знания заложены, как фундаментальные.

Жизнь Ларисы Борисовны, как масштабного ученого, не ограничивается физическим существованием. Она продолжается в ее учениках, которые используют ее идеи для синтеза новых знаний вместе со своими учениками, они в свою очередь со своими учениками и это необратимый процесс, движущая сила которого является мощная энергетика, которой обладала Лариса Борисовна.

Храм-Часовня, построенный благодаря идее Ларисы Борисовны Сватовской, то же является ее продолжением – духовным и вот уже 25 лет молчаливо украшает и защищает наш университет зrimой и незримой духовной красотой.

Список литературы

1. Сватовская Л. Б. и др. Термодинамический и электронный аспекты свойств композиционных материалов для строительства и экозащиты. СПб.: ОАО «Издательство Стройиздат», 2004. 176 с.
2. Шершнева М.В. Применение некоторых техногенных продуктов с гидратационно-активными минералами как адсорбентов при защите окружающей среды: автореф. дисс. к.т.н. Спб : ПГУПС, 2000г. 16 с.
3. Сватовская Л. Б., Панин А.В., Якимова Н.И. Смирнов А.В. и др. Фундаментальные подходы к созданию новых комплексных природозащитных технологий очистки биосферы. СПб.: ПГУПС, 2003. 80 с.
4. Сватовская Л. Б., Шершнева М.В., Макарова Е.И., Байдарашвили М.М. и др. Информационное значение инженерно-химических параметров некоторых веществ и процессов для использования их в интересах устойчивого развития общества. СПб.: ПГУПС, 2013. 80 с.
5. Сватовская Л. Б., Якимова Н.И., Шершнева М.В., Байдарашвили М.М. Применение индикаторного метода – новое перспективное направление для выбора компонентов экозащитных систем для транспорта // Наука и техника транспорта. 2004. №2. с. 12-17
6. Сватовская Л. Б. Храм-Часовня во имя святого благоверного князя Александра Невского при Петербургском государственном университете путей сообщения. СПб : ПГУПС, 2015г. 36 с.

References

1. Svatovskaya L.B. et al. Thermodynamic and electronic aspects of the properties of composite materials for construction and environmental protection. St. Petersburg : JSC "Publishing House Stroyizdat", 2004. 176 p.
2. Shershneva M.V. The use of certain technogenic products with hydration-active minerals as adsorbents for environmental protection. Dissertation of the Candidate of technical Sciences. St. Petersburg: PGUPS, 2000. 16 p.
3. Svatovskaya L.B., Panin A.V., Yakimova N.I. Smirnov A.V. et al. Fundamental approaches to the creation of new integrated environmental protection technologies for cleaning the biosphere. St. Petersburg: PGUPS, 2003. 80 p.
4. Svatovskaya L.B., Shershneva M.V., Makarova E.I., Baydarashvili M.M. et al. Informational significance of engineering and chemical parameters of certain substances and processes for their use in the interests of sustainable development of society. St. Petersburg: PGUPS, 2013. 80 p.
5. Svatovskaya L.B., Yakimova N.I., Shershneva M.V., Baydarashvili M.M. Application of the indicator method is a new promising direction for the selection of components of environmental protection systems for transport // Science and Technology of transport. 2004. No. 2. Pp. 12-17.
6. Svatovskaya L.B. Chapel Temple in the name of the Holy Prince Alexander Nevsky at the St. Petersburg State University of Railway Transport. St. Petersburg : PGUPS, 2015. 36 p.

2.1.5. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Технико-экономические показатели элементов гибридных структурных покрытий на основе сталефибробетона

УДК 693.5

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0008>

Номер статьи: C0008

Абу-Хасан Махмуд Самиевич

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1498-2800

abukhasan@pqups.ru

Домбровский Илья Геннадьевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Санкт-Петербург, Россия

illiadombrovskiy@gmail.com

Маркова Дарья Алексеевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

магистрант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Санкт-Петербург, Россия

darya.markova.3014@mail.ru

Статья получена: 02.11.2025. Одобрена: 18.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. В статье представлена информация о пространственных гибридных структурных покрытиях с применением сталефибробетона и методике подсчёта их технико-экономических показателей в зависимости от размеров на плане, временных нагрузок, используемых материалов. Показана краткая информация об известных вариантах структурных покрытий, целесообразность использования средств BIM технологии, программы Revit для оценки технико-экономических показателей элементов конструкций с использованием разработанных для этой цели расчётных таблиц. В области современных строительных конструкций особое место занимают сталефибробетонные системы, построенные на основе пирамидальных элементов. Классическая конфигурация предусматривает расположение вершин пирамид вверх при обязательном включении плит жесткости в общую структуру. Подобное решение демонстрирует высокую адаптивность к различным планировочным решениям. Параллельно развивается концепция композитных покрытий, где пирамидальные элементы имеют обратное направление вершин. Конструктивная схема предусматривает использование железобетонных фундаментов и стальных трубчатых элементов в зонах растяжения. Характерной чертой является диагональное распределение металлических элементов в нижнем поясе. Функциональные достоинства системы заключаются в рациональном использовании строительных материалов. Применение шахматного принципа размещения элементов открывает возможности для эффективной интеграции светопропускающих конструкций, что положительно сказывается на микроклимате помещения. Аналитические

исследования подтверждают превосходство гибридной системы по показателю материалаомкости. Вместе с тем отмечается существенный фактор — двукратное превышение габаритной высоты по сравнению с традиционными регулярными структурами.

Ключевые слова: стальфибробетонные конструкции, элементы структурного покрытия, стальфибробетон, пирамидальные элементы, BIM технологии, гибридные конструкции.

Technical and economic indicators of elements of hybrid structural coatings based on steel fiber concrete

Abu-Khasan MaKhmud Samievich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Professor, Department of Building Structures, Buildings, and Constructions
St. Petersburg, Russian Federation

abukhasan@pgups.ru

Dombrovskiy Ilya Gennadievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Department of Engineering Graduate student, Department of Civil Engineering, Buildings, and Structures
St. Petersburg, Russian Federation

illiadombrovskiy@gmail.com

Markova Darya Alekseevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Department of Engineering Master's student, Department of Civil Engineering, Buildings, and Structures
St. Petersburg, Russian Federation

darya.markova.3014@mail.ru

Abstract. The article presents information on spatial hybrid structural coatings using steel fiber reinforced concrete and a methodology for calculating their technical and economic indicators depending on the dimensions on the plan, temporary loads, and the materials used. It also provides brief information on known variants of structural coatings, the feasibility of using BIM technology and the Revit program for assessing the technical and economic performance of structural elements using calculation tables developed for this purpose. Steel fiber concrete systems built on the basis of pyramidal elements occupy a special place in the field of modern building structures. The classic configuration involves the location of the pyramid apexes upwards with the obligatory inclusion of stiffening slabs in the overall structure. This solution demonstrates high adaptability to various planning solutions. In parallel, the concept of composite coatings is developing, where the pyramidal elements have the opposite direction of apexes. The structural scheme provides for the use of reinforced concrete foundations and steel tubular elements in tension zones. A characteristic feature is the diagonal distribution of metal elements in the lower chord. The functional advantages of the system lie in the rational use of building materials. The staggered placement of elements opens up opportunities for the effective integration of translucent structures, which positively impacts the indoor microclimate. Analytical studies confirm the superiority of the hybrid system in terms of material consumption. However, a significant factor is noted: the overall height is twice as high as that of traditional regular structures.

Keywords: steel fiber concrete structures, structural roof elements, steel fiber concrete, pyramidal elements, BIM technologies, hybrid structures.

Введение

В современном строительстве активно применяются три ключевых типа структурных покрытий: металлические конструкции, армоцементные системы и покрытия из сталяфибробетона [1].

История развития пространственных металлических конструкций берёт своё начало в период с 1847 по 1922 год, когда выдающийся американский учёный Александр Г. Белл создал первые подобные системы. В отечественной практике широко известны структурные покрытия «Кисловодск», «Берлин» и «ЦНИИСК», которые, согласно экспертным оценкам, демонстрировали до 40% экономии по сравнению с традиционными металлическими конструкциями в середине XX века [2-3].

Эти три направления — металлическое, армоцементное и сталяфибробетонное — формируют основу современного конструктивного решения в области структурных покрытий, предлагая строителям разнообразные возможности для реализации архитектурных замыслов.

1. Структурные покрытия гражданских зданий на основе сталяфибробетона

При разработке конструкций из сталяфибробетона важно правильно подобрать тип армирования, который будет оптимальным для конкретного элемента. Выбор зависит от того, как элемент будет вести себя под нагрузкой, то есть от его напряженно-деформированного состояния. Существует два основных способа армирования таких конструкций: Фибровое армирование — когда используется только стальная фибра, равномерно распределённая по всему объёму бетона; комбинированное армирование — когда одновременно применяются стальная фибра и традиционная арматура (стержневая или проволочная). Такой подход к выбору типа армирования позволяет максимально эффективно использовать прочностные характеристики материала и обеспечить надёжность конструкции в различных условиях работы. Оба метода имеют свои преимущества и могут применяться как по всей площади сечения элемента, так и в отдельных его зонах, где это наиболее целесообразно [4-5].

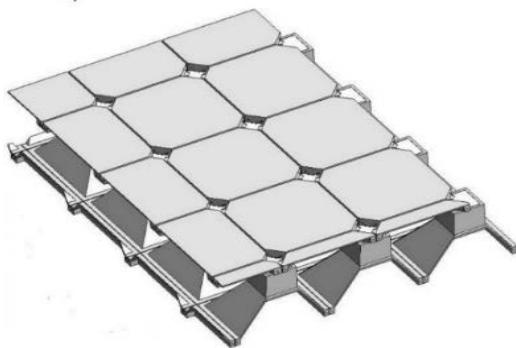


Рис. 1. Структурное покрытие из армоцементных элементов.
BIM модель конструкции покрытия

В современном строительстве нашли применение два типа структурных покрытий из сталяфибробетона. Регулярная конструкция базируется на пирамидальных элементах с направленными вверх вершинами, которые дополняются плитами жесткости. Благодаря такой компоновке возможно эффективное использование покрытия в помещениях различной планировки [6-7].

Параллельно развивается концепция гибридного покрытия, представляющего собой инновационное решение с пирамидальными элементами, ориентированными вершинами вниз. Конструкция включает в себя железобетонные основания и стальные трубы,

размещённые в растянутой зоне. Характерной особенностью является формирование нижнего пояса из отдельных металлических труб, создающих диагональную решётку, в то время как верхний пояс сохраняет ортогональную структуру.

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность данной конструктивной системы. Особого внимания заслуживает возможность шахматного размещения элементов, позволяющая устанавливать светоаэрационные фонари с определённым шагом. Это не только улучшает естественное освещение помещения, но и придаёт интерьеру уникальный архитектурный облик [8-].

Сравнительный анализ показал, что гибридная конструкция демонстрирует меньшую материалоёмкость по сравнению с регулярной системой. Однако необходимо учитывать существенный фактор: расчётная высота гибридного покрытия приблизительно в два раза превышает аналогичный показатель традиционной регулярной структуры [10-11].

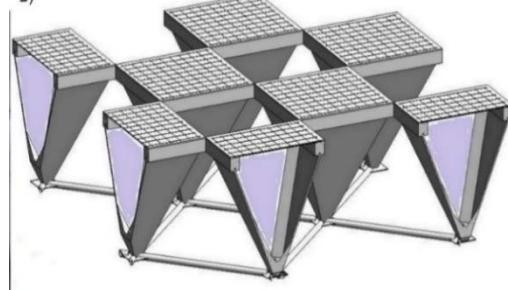


Рис. 2. Гибридное структурное покрытие с пирамидальными элементами со стальфибробетонными гранями и железобетонными основаниями, закреплёнными к растянутому поясу. BIM модель гибридной конструкции покрытия

2. Определение технико-экономических показателей структурных покрытий с использованием элементов BIM

В центре внимания находится инновационная конструкция покрытия, особенностью которой является комбинированная структура с использованием различных материалов. Основу системы составляют пирамидальные элементы, изготовленные из стальфибробетона, которые ориентированы вершинами вниз. Конструкция характеризуется наличием массивного железобетонного основания, обеспечивающего необходимую прочность и устойчивость всей системы.

Особенность данной разработки заключается в том, что растянутый пояс покрытия формируется из стальных труб, которые эффективно работают на растяжение и дополняют несущую способность стальфибробетонных элементов. Такое сочетание разнородных материалов позволяет создать надёжную пространственную систему, где каждый компонент выполняет свою функциональную роль в общей работе конструкции.

Особое значение имеет использование BIM технологий (BIM — Building Information Modelling) при проектировании конструкций со сложной геометрией, таких как структурные покрытия (Рис. 3, 4, 5) [11-12].

С помохи информационной модели конструкции была создана расчетная схема, учитывающая геометрию конструкции, что позволило оценить технико-экономические показатели (Рис. 6) каждого конструктивного элемента покрытия, используя результаты статического (выполненного средствами ПВК SCAD) и конструктивного (средствами программы для ЭВМ расчётов №2012619865 от 31.10.2012 см.) [13-14].

По результатам анализа статического расчета, структурные элементы разделены на группы унификации (Рис 3).

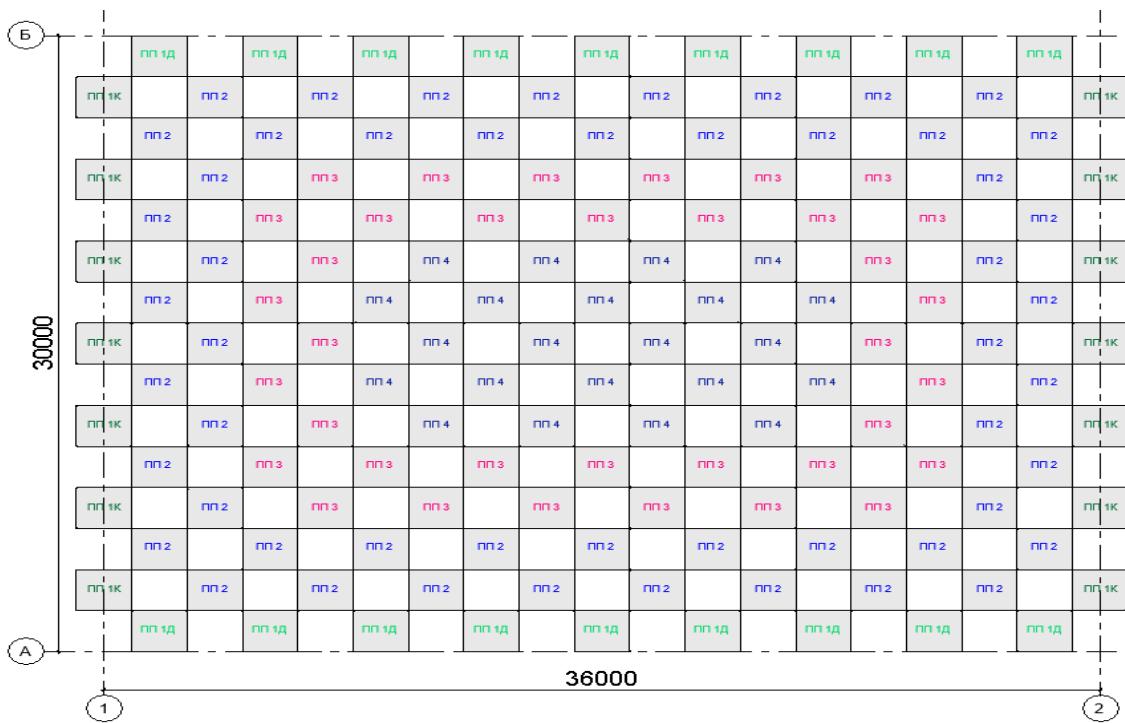


Рис. 3. План раскладки пирамидальных элементов гибридного структурного покрытия на основе сталефибробетона в осях 1-2/А-Б

Целью проведения оценки технико-экономических показателей для заданного размера и конфигурации покрытия является определение наиболее рациональный (по геометрии, и расходу материалов) варианта сечений и размеров конструктивных элементов [15-17].

Для получения технико-экономических показателей средствами программы Revit сформирована информационная модель структурного элемента. Для упрощения работы и внесения корректировок в размеры элементов и свойства материалов модели присвоены параметры, при изменении которых происходит изменение геометрии с последующим перерасчетом технико-экономических показателей. Параметры информационной модели приведены на Рис. 4.

После создания информационной модели структурного элемента произведена загрузка в проект и компоновка геометрии всего покрытия (Рис. 5), созданы типоразмеры согласно расчетам. Всем типоразмерам присвоен необходимый процент фибрового армирования.

Для получения количества затраченных материалов создана спецификация конструктивных элементов и настроена, согласно необходимой для получения технико-экономических показателей (Таблица 1).

Параметр	
Размеры	
Размер структурного элемента в плане, мм	2000.0
Высота структурного элемента, мм	2200.0
Толщина боковых граней структурного элемента, мм	30.0
Высота сечения плиты, мм	20.0
Длина продольной и поперечной арматуры в плите, мм	1880.0
Диаметр продольной и поперечной арматуры в плите, мм	5.0
Шаг поперечной и продольной арматуры в плите, мм	200.0
Длина выпусков продольной и поперечной арматуры в плите, мм	40.0
Высота сечения ребра в сжатой зоне структурного элемента, мм	240.0
Ширина сечения ребра в сжатой зоне структурного элемента, мм	200.0
Размер выступа ребра относительно грани структурного элемента, мм	75.0
Диаметр арматуры в ребре структурного элемента, мм	22.0
Длина арматуры в ребре структурного элемента, мм	1880.0
Растояние от оси арматуры до внешней стороны ребра, мм	30.0
Высота вту в вершине пирамидального структурного элемента, мм	250.0
Ширина вту в вершине пирамидального структурного элемента, мм	150.0
Высота сечения вту между боковыми гранями структурного элемента, мм	100.0
Диаметр арматуры в вту между боковыми гранями структурного элемента, мм	10.0
Размер закладной детали в вершине структурного элемента в плане, мм	440.0
Толщина закладной детали в вершине структурного элемента, мм	10.0
Диаметр стержня закладной детали в вершине структурного элемента, мм	36.0
Размер скоса закладной детали в вершине структурного элемента, мм	100.0
Ширина уголка в сжатом поясе структурного элемента, мм	63.0
Толщина уголка в сжатом поясе структурного элемента, мм	6.0
Длина анкера уголка в сжатом поясе структурного элемента, мм	100.0
Диаметр анкера уголка в сжатом поясе структурного элемента, мм	6.0

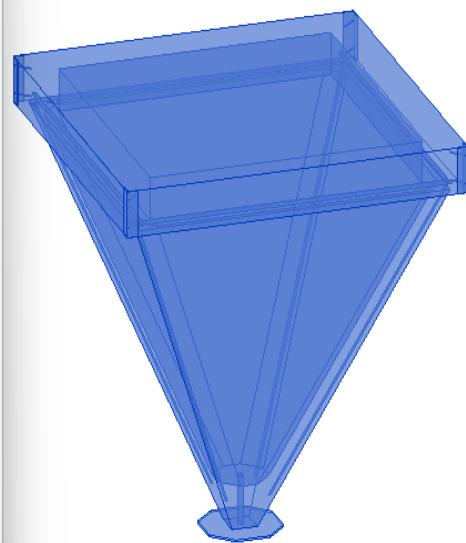


Рис. 4. Пользовательская параметрическая модель структурного элемента, сформированная средствами программы Revit

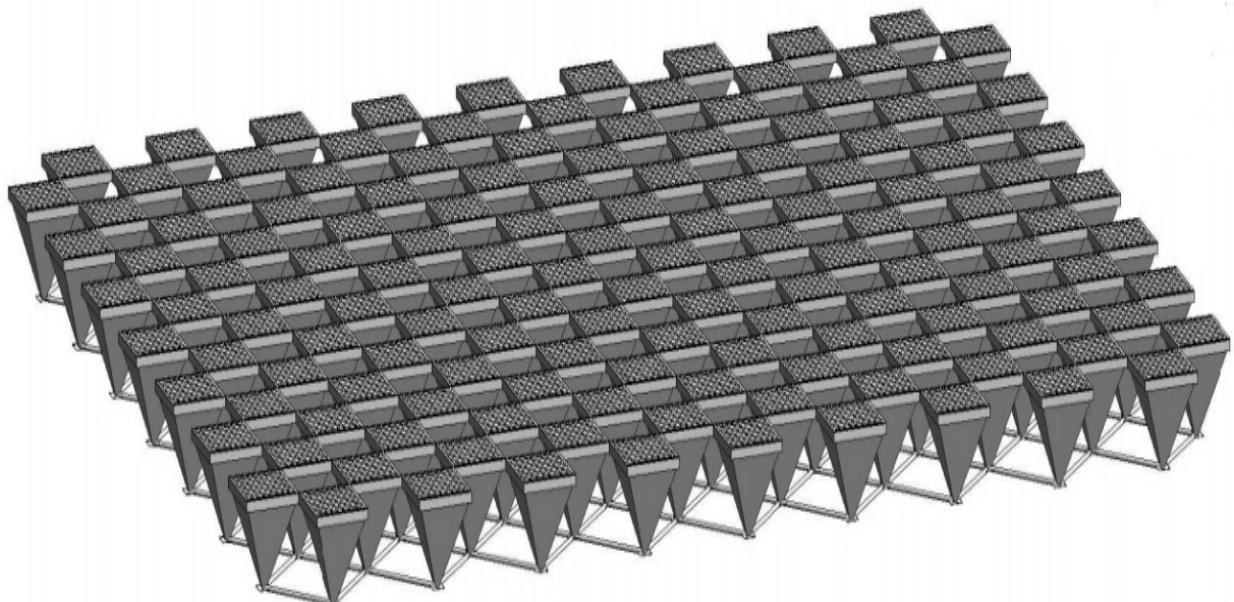


Рис. 5. Информационная модель структурного покрытия с пирамидальными элементами вершиной вниз

Таблица 1.

**Технико-экономические показатели групп унификации
сталефиброжелезобетонных элементов структурного покрытия**

ПП-4	ПП-3	ПП-2	ПП-1К	ПП-1Д	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	Максимальное напряжение растяжения, σ_t МПа		Масса, т		Расход бетона, m^3	Расход стали, кг			
							пирамида	плита	Объемный процент армирования, %	на элемент	на всё покрытие	на элемент			
												на элемент	на всё покрытие		
ПП-4	ПП-3	ПП-2	ПП-1К	ПП-1Д	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	18	3.7	8.1	4.1	0.7012	12.6	0.3	5.5	3076.2
							14	1.9	2.2	1.4	0.6093	11	0.25	4.6	
							52	2.3	6.2	2	0.7012	9.8	0.3	4.3	
							36	2.4	1.6	2.7	0.7281	10.2	0.3	4.2	
ПП-4	ПП-3	ПП-2	ПП-1К	ПП-1Д	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	1.6	5	1	0.6841	35.6	0.3	15.5	1764	
							0.9	3.2	0.5 7	0.6405	33.3	0.27	13.9		
							0.3	2.5	0.5 3	0.6444	23.2	0.28	10.1		
							0.3	2	0.6 1	0.671	24.2	0.28	10.1		
ПП-4	ПП-3	ПП-2	ПП-1К	ПП-1Д	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	0.9	1.7	0.5 3	0.817	18	0.36	7.8	4258.8	
							0.8	1.7	0.5 3	0.5813	12.8	0.24	5.3		
Трубы 114×3.8	144	-	-	-	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	-	-	-	-	-	-	-	2084.4	
							0.026	3.8	-	-	-	-	-		
Трубы 114×5.5	108	-	-	-	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	0.037	4.0	-	-	-	-	-	1190.2	
							-	-	-	-	-	-	-		
Уголок накладной	-	-	-	-	Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	0.001	0.24	-	-	-	-	-	192	
							-	-	-	-	-	-	-		
Всего		394					198.7		81.2					19665	

3. Определение параметров фибрового армирования средствами Microsoft Excel

Параметры фибрового армирования определены на основе анализа полей напряжений, полученных в результате статического расчета осуществленного средствами ПВК SCAD (Рис. 6) [19].

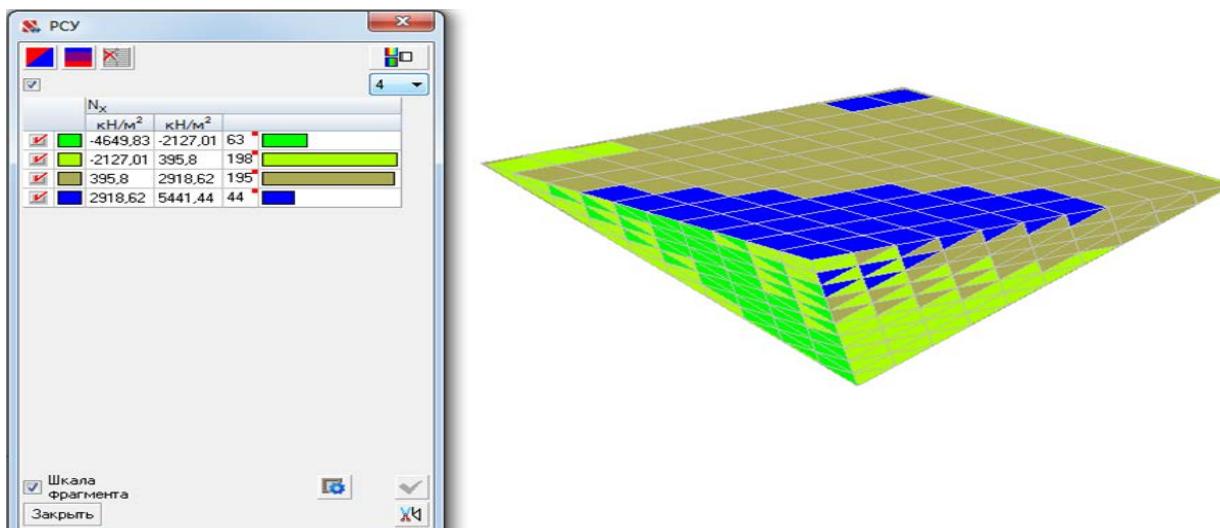


Рис. 6. Картина полей напряжений Nx в наиболее загруженном пирамидальном элементе типоразмера ПП-1

Выводы

В специализированное программное обеспечение (зарегистрированное под номером 2012619865 от 31.10.2012) вводятся исходные данные для расчёта: измеренные значения напряжений, геометрические параметры расчётного сечения, характеристики применяемой фибры и тип бетонного состава. После выполнения вычислительных операций программа выдаёт комплексный результат, включающий геометрические параметры армирующих волокон (диаметр и длину), прочностные характеристики бетонной основы, оптимальный процент армирования конструкции и расчётные показатели сопротивляемости сформированного сталефибробетонного композитного материала. Такая методика обеспечивает точное определение необходимых параметров армирования и прочностных характеристик конечного строительного материала.

Список литературы:

1. Сычева А.М., Рябова С.С., Сычев М.М., Христюк Н.А., Шевчук А.М. Жаростойкая фиброкерамика для тепловых агрегатов специального строительства // Новые огнеупоры. 2024. №. 1. Стр. 44-51. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2024-1-44-51>
2. Сычева А.М. Использование поверхностной энергии наночастиц для получения высокопрочного бетона // Новые огнеупоры. 2023. № 8. Сс. 21-27. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2023-8-21-27>
3. Алешичев С.Е., Старчуков Д.С., Сычева А.М. Математическая модель расчета прочности бетонного образца в монолитной неорганической обойме // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № 681. С. 125-128. URL: <http://trudvka.ru/download/2022/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B%20681.pdf>
4. Веселов В.В., Цабадзе С.Р., Руденко Н.В. Применение легких стальных тонкостенных и гибридных конструкций при проектировании объектов транспорта // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 8 (1080). С. 26-30. <https://elibrary.ru/item.asp?id=68509732>

5. Веселов В.В., Балаев Д.В., Фролова Е.Д. Применение гибридных балок в строительных конструкциях зданий и сооружений // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 5 (1065). С. 32-34. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50767545>
6. Арещенко Т.С., Фисенко А.С., Веселов В.В. Применение комбинированных структурных конструкций в покрытиях зданий // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. Сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах. ответственные за выпуск О.В. Гимазетдинова, М.С. Панова. 2022. С. 210-214. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49942302>
7. Веселов В.В., Пегин П.А. Инновационные конструкции перекрытий и покрытий // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 11 (1059). С. 36-39. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49610869>
8. Веселов В.В. Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 3. С. 631-638. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-631-638>
9. Veselov V., Talantova K. HYBRID BEAM STRUCTURES OF TRANSPORT BUILDINGS // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Switzerland, 2022. С. 278-285. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48421384>.
10. Веселов В.В., Егоров В.В., Перминова Т.А., Бакина О.А., Сидорова П.С. Гибридные конструкции подкрановых балок // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 2 (1038). С. 51-53. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44611204>
11. Егоров В.В. Комбинированные системы шпренгельного типа // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции. 2020. С. 13-16. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44057382>.
12. Egorov V., Belyy G. Nonlinear properties of hybrid construction of coatings of buildings and structures // International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering" (ERSME-2020). 2020. V. 217. Art.ID 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021701001>
13. Федоров А.М., Егоров В.В., Лопухов В.Ю. Гибридные несущие системы с применением композитных материалов для зданий и сооружений // Роль молодых ученых в решении актуальных задач апк. Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся, посвящается 115-летию Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. С. 298-300. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41146004>.
14. Соловьева В.Я., Егоров В.В., Шварц Ф.М. Тонкостенные строительные конструкции повышенного уровня свойств для высотного строительства // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 9 (1021). С. 57-59. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39585470>.
15. Талантова К.В. Определение области включения в расчёт прочности растянутой полки сталефиброжелезобетонной плиты перекрытия // Строительная механика и конструкции. 2022. № 2 (33). С. 62-72. <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitelnaya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/33.pdf>
16. Талантова К.В. Перспективные тонкостенные конструкции на основе сталефибробетона // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Мматериалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. Курск, 2021. С. 67-73. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47478159>
17. Талантова К.В. О правилах проектирования конструкций на основе сталефибробетона // Актуальные вопросы архитектуры и строительства. Материалы XIII Международной научно-технической конференции. 2020. С. 41-47. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44233930>

References

1. Sycheva A.M., Ruabova S.S., Sychev M.M., Khristyuk N.A., Shevchu A.M. Heat-resistant fibroceramics for thermal units of special construction. // NEW REFRACTORIES. 20242024. No. 1. Pp. 44-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2024-1-44-51>
2. Sycheva A.M. Using the surface energy of nanoparticles to produce high-strength concrete // NEW REFRACTORIES. 2023. № 8. Pp. 21-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2023-8-21-27>
3. Aleshichev S.E., Starchukov D.S., Sycheva A.M. Mathematical model for calculating the strength of a concrete specimen in a monolithic inorganic shell // Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy. 2022. No. 681. Pp. 125-128. URL: <http://trudvka.ru/download/2022/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B%20681.pdf>
4. Veselov V.V., Tsabadze S.R., Rudenko N.V. Application of lightweight steel thin-walled and hybrid structures in the design of transport facilities // BST: Bulletin of Construction Equipment. 2024. No. 8 (1080). Pp. 26-30. <https://elibrary.ru/item.asp?id=68509732>.
5. Veselov V.V., Balaev D.V., Frolova E.D. Application of hybrid beams in building structures. // BST: Bulletin of construction equipment. 2023. No. 5 (1065). pp. 32-34. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50767545>
6. Arechchenko T.S., Fisenko A.S., Veselov V.V. Application of combined structural designs in building roofs. In the collection: Transport: Problems, Ideas, Prospects. Collection of papers of the LXXXII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists, in two volumes. Responsible for the release O.V. Gimazetdinova, M.S. Panova. 2022. pp. 210-214. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49942302>
7. Veselov V.V., Pegin P.A. Innovative Designs of Floors and Roofs // BST: Bulletin of Construction Equipment. 2022. No. 11 (1059). Pp. 36-39. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49610869>
8. Veselov V.V. Hybrid Beam Structures in Transport Using Metal and Composites // Bulletin of the St. Petersburg Transport University. 2022. Vol. 19. No. 3. Pp. 631-638. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-631-638>
9. Veselov V., Talantova K. HYBRID BEAM STRUCTURES OF TRANSPORT BUILDINGS In the collection: International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Switzerland, 2022. Pp. 278-285. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48421384>.
10. Veselov V.V., Egorov V.V., Perminova T.A., Bakina O.A., Sidorova P.S. Hybrid designs of overhead crane beams // BST: Bulletin of construction equipment. 2021. No. 2 (1038). pp. 51-53. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44611204>
11. Egorov V.V. Combined truss-type systems. In the collection: Innovative technologies in construction and geoecology. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference. 2020. Pp. 13-16. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44057382>.
12. Egorov V., Belyy G. Nonlinear properties of hybrid construction of coatings of buildings and structures // International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering" (ERSME-2020). 2020. V. 217. Art.ID 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021701001>
13. Fedorov A.M., Egorov V.V., Lopukhov V.Yu. Hybrid load-bearing systems using composite materials for buildings and structures. In the collection: The Role of Young Scientists in Solving Current Problems of the APK. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, dedicated to the 115th anniversary of the Saint Petersburg State Agrarian University. 2019. pp. 298-300. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41146004>.
14. Solovieva V. Ya., Egorov V. V., Schwartz F. M. Thin-Walled Building Structures with Advanced Properties for High-Rise Construction // BST: Bulletin of Construction Equipment. 2019. No. 9 (1021). pp. 57-59. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39585470>.
15. Talantova K. V. Determination of the Area of Inclusion in the Strength Calculation of the Tensile Flange of a Steel Fiber Reinforced Concrete Floor Slab. Structural Mechanics and

- Structures. 2022. No. 2 (33). pp. 62-72. <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitelnaya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/33.pdf>
16. Talantova K.V. Advanced thin-walled structures based on steel fiber reinforced concrete. In the collection: Safety of the Russian construction stock. Problems and solutions. Proceedings of the International Academic Readings. Kursk State University. Kursk, 2021. pp. 67-73. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48588898>.
17. Talantova K.V. On the design rules for structures based on steel fiber reinforced concrete. In the collection: Current Issues in Architecture and Construction. Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. 2020. pp. 41-47. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44233930/>

Исследование золы от сжигания осадка сточных вод как сырья для создания инновационных строительных материалов

УДК 691-478, 543.442.2

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0009>

Номер статьи: C0009

Русанова Екатерина Владимировна

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2768-4523

rusanova@pgups.ru

Статья получена: 03.11.2025. Одобрена: 08.12.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. В данной статье был проанализирован качественный состав золы от сжигания осадка сточных вод методом неразрушающего исследования при помощи рентгеновского дифрактометра ЭКРОС XRD-9500. Проведённые исследования доказывают, что возможно использование золы от сжигания осадка сточных вод в качестве сырья в том числе для строительных материалов с особыми свойствами.

Ключевые слова: сырьё, изоляционный золопенобетон, анализ, зола от сжигания осадка сточных вод, золопенобетон, рентгенофазовый анализ.

Research of ash from the incineration of sewage sludge as a raw material for the creation of innovative building materials

Rusanova Ekaterina Vladimirovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Department of Water supply, Sewerage and Hydraulics, Associate Professor

St. Petersburg, Russian Federation

rusanova@pgups.ru

Abstract. In this article, the qualitative composition of ash from incineration of sewage sludge by non-destructive examination using the ECROS XRD-9500 X-ray diffractometer was analyzed. The studies conducted prove that it is possible to use ash from the burning of sewage sludge as raw materials, including for building materials with special properties.

Keywords: raw materials, insulating ash-foam concrete, analysis, ash from the incineration of sewage sludge, ash foam concrete, X-ray analysis.

Введение

До настоящего времени окончательно не решён вопрос с утилизацией основных отходов жилищно-коммунального хозяйства, таких как сточные воды. Они проходят очистку на очистных сооружениях, тогда как осадок, остающийся после очистки, чаще всего складируется на полигонах. В городе Санкт-Петербурге частично решена данная проблема – осадок сточных вод сжигается на ЗСО (заводах сжигания осадка), в результате чего объём его существенно сокращается примерно на порядок. Однако по-прежнему полигоны

продолжают заполняться, но уже не так интенсивно. Актуальность данной работы связана с исследованием золы от сжигания осадка сточных вод как потенциального сырья для создания инновационных строительных материалов.

История вопроса

В Санкт-Петербурге на настоящий момент работает три завода по сжиганию осадка сточных вод – на Центральной станции аэрации, о. Белый, на Северной станции аэрации и на Юго-Западных очистных сооружениях. Частично задача использования золы от сжигания осадка сточных вод была решена в работах [1, 2], где зола от сжигания осадка сточных вод использовалась как компонент автоклавного золопенобетона¹, также отдельно в литературе рассматривался вопрос об использовании зол различного происхождения как сырья при производстве строительной керамики [3], лёгких бетонов [4] и других видов строительных изделий. Одновременно были выявлены и недостатки использования золы от сжигания осадка сточных вод как сырья – в том числе такие как токсичность и повышенное содержание радионуклидов [3, 5, 6], что может препятствовать применению изготовленных материалов в гражданском строительстве, где есть серьёзные ограничения к качеству исходного сырья. Однако применение для промышленности, железнодорожного транспорта, оборонных и других негражданских объектов таких ограничений нет.

Эксперимент

Микрофотография частиц золы балы выполнена в научно-исследовательской лаборатории комплексных физико-химических исследований на металлографическом микроскопе Altami MET 6C. Результаты представлены на Рис. 1. Видно, что зола от сжигания осадка сточных вод представляет собой мельчайшие частицы красно-коричневого цвета с очень развитой поверхностью.

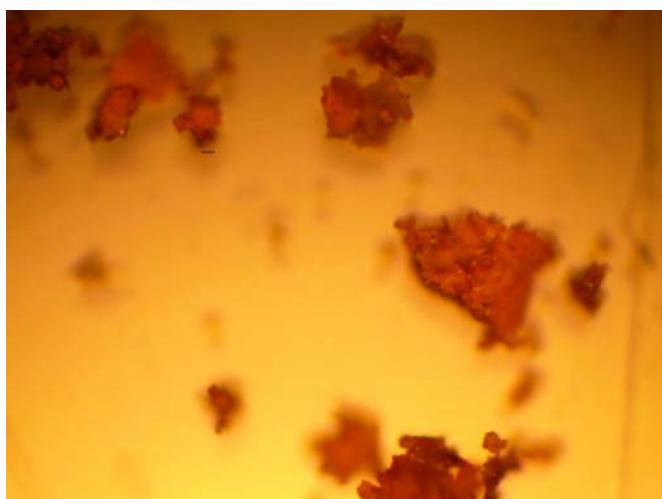


Рис. 1. Частицы золы от сжигания осадка сточных вод

¹ 1. Патент № 2256632 С1 РФ, МПК C04B 38/10. Автоклавный золопенобетон : № 2004108763/03 : заявл. 24.03.2004 : опубл. 20.07.2005 / Л. Б. Сватовская, В. Я. Соловьева, А.В. Хитров [и др.] ; заявитель ГОУВПО "Петербургский государственный университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации". ZOLIUX.

2. Патент № 2646924 С1 РФ, МПК C04B 38/10. Автоклавный золопенобетон : № 2017110314 : заявл. 28.03.2017 : опубл. 12.03.2018 / Л. Б. Сватовская, А. М. Сычева [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I". FZZPQA.

3. Патент № 2647712 С1 РФ, МПК C04B 38/10, C04B 28/04, C04B 18/10. Автоклавный золопенобетон : № 2017110120 : заявл. 27.03.2017 : опубл. 19.03.2018 / Л. Б. Сватовская, М. Абу-Хасан [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I". ZEDTXN.

Рассмотрение образцов золы от сжигания осадка сточных вод проводился на дифрактомере рентгеновский ЭКРОС XRD-9500 (внесён в государственный реестр средств измерений РФ под № 88425-23.Р). Проведение опытов с использованием рентгеновского излучения для анализа структуры материалов осуществлялся в научно-исследовательской лаборатории комплексных физико-химических исследований Петербургского государственного университета путей сообщения. В качестве исследуемого материала использовалась зола от сжигания осадков сточных вод о. Белый, г. Санкт-Петербург. Результаты представлены на Рис. 2 в виде дифрактограммы образца.

Дифрактограмма образца, $\lambda: 2,29091$

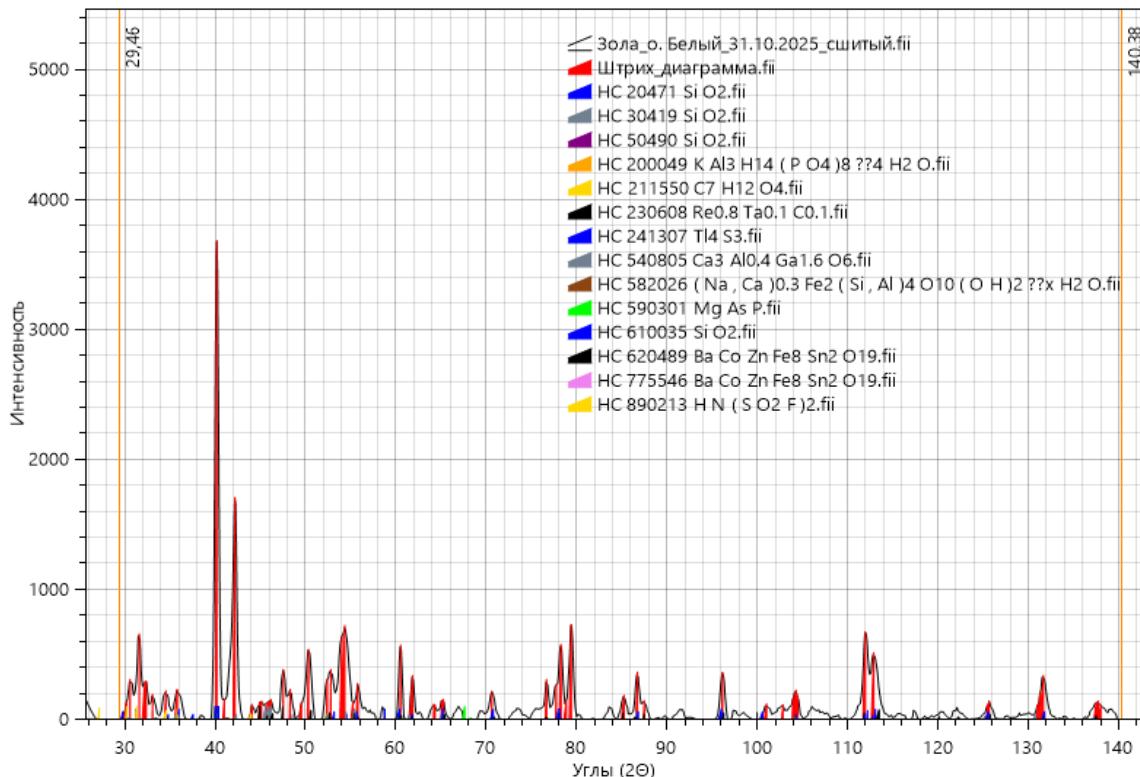


Рис. 2. Дифрактограмма образца, $\lambda: 2,29091$

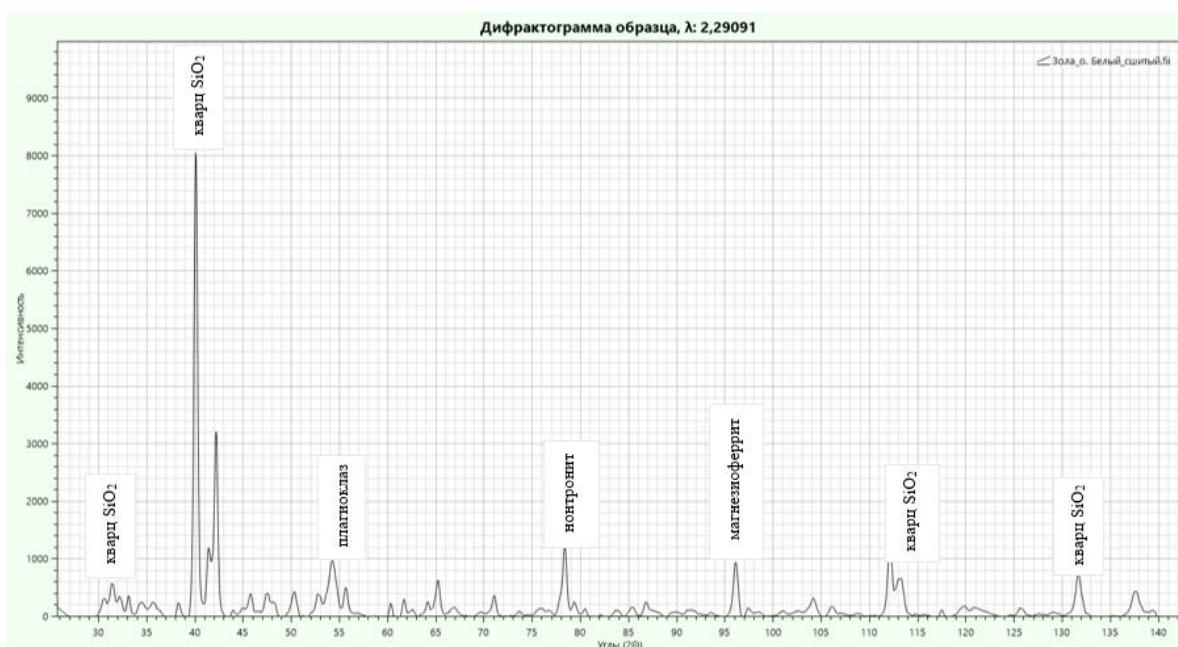


Рис. 3. Наиболее выраженные вещества

На Рис. 3 представлены наиболее выраженные идентифицированные вещества. На дифрактограмме образца выявлены пики, соответствующие минералам кварца SiO_2 , также были выявлены соединения: магнезиоферрит MgFe_2O_4 , плагиоклаз $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, нонtronит $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2\cdot\text{nH}_2\text{O}$

Фазы, определённые при помощи рентгенофазового анализа с использованием рентгеновского излучения для анализа структуры материалов, представлены в Таблице 1. Из таблицы видно, что данный вид сырья является многокомпонентным сложным веществом, которое имеет в своём составе в виде основного компонента оксид кремния в виде аморфной фазы.

Таблица 1
Таблица определённых фаз

ID	Формула	Название	Минерал
20471	SiO_2	Silicon Oxide	Quartz
30419	SiO_2	Silicon Oxide	Quartz
50490	SiO_2	Silicon Oxide	Quartz, low
200049	$\text{KAl}_3\text{H}_{14}(\text{PO}_4)_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Potassium Aluminum Hydrogen Phosphate Hydrate	
211550	$\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$	4-C-Cyclopropyl-d-xylo-tetrofuranose	
230608	$\text{Re}_{0.8}\text{Ta}_{0.1}\text{C}_{0.1}$	Rhenium Tantalum Carbide	
241307	Ti_4S_3	Thallium Sulfide	
540805	$\text{Ca}_3\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{1.6}\text{O}_6$	Calcium Aluminum Gallium Oxide	
582026	$(\text{Na},\text{Ca})_{0.3}\text{Fe}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot\text{xH}_2\text{O}$	Sodium Calcium Iron Aluminum Silicate Hydroxide Hydrate	Nontronite
590301	Mg As P	Magnesium Arsenide Phosphide	
610035	SiO_2	Silicon Oxide	
620489	$\text{Ba Co Zn Fe}_8\text{Sn}_2\text{O}_{19}$	Barium Cobalt Zinc Iron Tin Oxide	
775546	$\text{Ba Co Zn Fe}_8\text{Sn}_2\text{O}_{19}$	Potassium Sodium Manganese Aqua Tungsten Silicate Hydrate	
890213	$\text{H N} (\text{SO}_2\text{F})_2$	Hydrogen Nitrogen Sulfonyl Fluoride	

Результаты и обсуждение

Основная фаза, которая была идентифицирована в рентгенофазовом анализе – диоксид кремния (кварц), это частично объясняется тем, что при сжигании осадка сточных вод используется система «пирофлюид», когда предварительно обезвоженный осадок сжигается в печах с псевдосжигаемым слоем песка. При этом часть песка подвергается повышенному истиранию, вследствие чего уносится вместе с золой. В исследованиях было установлено, что добавление аморфной фазы вместо кристаллической фазы при производстве строительных материалов (то есть, замена процентного содержания песка на золу от сжигания осадка сточных вод) способствует уменьшению свободного пробега фонаона². Как было доказано, это приводит к тому, что золопенобетонные конструкции

² Патент № 2647712 С1 РФ, МПК C04B 38/10, C04B 28/04, C04B 18/10. Автоклавный золопенобетон: № 2017110120 : заявл. 27.03.2017: опубл. 19.03.2018 / Л. Б. Сватовская, М. Абу-Хасан [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I".ZEDTXN.

обладают улучшенными свойствами по теплоизоляции, а также по шумозащитным свойствам по сравнению с пенобетонами, где такой добавки нет. Наличие в исследуемых образцах плагиоклаза и карбида тантала — предполагает использование данного материала как возможное сырьё при изготовлении керамического материала, который будет обладать повышенной устойчивостью к тепловым ударам и механической эрозии. Однако наличие в составе нонtronита может повышать сорбционную способность материалов.

Таким образом возможно утилизировать золу от сжигания осадка сточных вод практически по замкнутому циклу (Рис. 4).



Рис. 4. Жизненный цикл коммунальных сточных вод

Также возможно будет утилизировать золу, которая производится в настоящее время на трёх заводах Санкт-Петербурга, а при наличии реализуемых проектов по негражданскому строительству, возможно и освободить те территории полигонов, которые в настоящий момент отведены под хранение и куда свозится производимая зола от сжигания осадка сточных вод. Возможные направления использования золы от сжигания осадка сточных вод как источника основного или дополнительного сырья при производстве материалов различного назначения:

- ограждающие строительные конструкции;
- теплозащитные материалы;
- шумозащитные материалы;
- жаростойкие керамические изделия;
- керамические изделия повышенной прочности;
- строительные материалы с особыми свойствами;
- другие специальные строительные конструкции.

Выводы

Предполагается разработка и использование новых материалов как часть многослойных ограждающих конструкций, каждый слой которой будет обладать особыми свойствами, такими как особопрочностные характеристики, шумозащитные свойства, теплоизоляционные свойства и другие.

Список литературы

1. Sychova A., Sychov M., Rusanova E. Method of Obtaining Geonoiseprotective Foam Concrete for Use on Railway Transport // Procedia Engineering. 2017. V. 189. Pp. 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.108>
2. Русанова Е. В. Технологии утилизации некоторых отходов промышленности и транспорта и их комплексная оценка: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. н. Санкт-Петербург, 2005. 211 с. EDN NNPYBVX
3. Шахов, С. А. Экологическая оценка утилизации осадка бытовых сточных вод в виде золы при производстве строительной керамики // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2(61). С. 77-85. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_77. EDN YZVUCW
4. Красова А. В., Смирнова О. Е., Шахов С. А. Исследование физико-химических свойств осадка ливневых сточных вод для применения в производстве лёгкого бетона //

- Эксперт: теория и практика. 023. № 3(22). С. 93-97. DOI 10.51608/26867818_2023_3_93. EDN XPNITH
5. Семенова В. В., Аликбаева Л. А. Оценка токсичности и опасности отходов, образующихся при очистке городских сточных вод и сжигании осадка // Гигиена и санитария. 2008. № 2. С. 52-54. EDN TIWYAV
 6. Рusanova, E. B., Maslennikova L. L. Безопасное размещение отходов повышенной радиоактивности // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии : Материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 30 июня 2015 года / Петербургский государственный университет путей сообщения имени императора Александра I, Кафедра «Инженерная химия и естествознание». Москва: ООО "Издательство "Спутник+", 2015. С. 98-100. EDN UKCUOD

References

7. Sychova A., Sychov M., Rusanova E. Method of Obtaining Geonoiseprotective Foam Concrete for Use on Railway Transport // Procedia Engineering. 2017. V. 189. Pp. 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.108>
8. Rusanova, E. V. Technologies for the disposal of some industrial and transport waste and their comprehensive assessment: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, 2005. 211 p.
9. Shakhov, S. A. Environmental assessment of the domestic sewage sludge disposal in the form of ash when producing building ceramics // Bulletin of the Siberian State University of Railways. 2022. № 2(61). Pp. 77-85. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_77
10. Krasova A. V., Smirnova O. E., Shakhov S. A. Investigation of physicochemical properties of stormwater sludge for use in the production of lightweight concrete // Expert: theory and practice. 2023. № 3(22). Pp. 93-97. DOI 10.51608/26867818_2023_3_93
11. Semenova V.V., Alikbaeva L.A. Evaluation of the toxicity and hazard of waste resulting from municipal sewage purification and sediment incineration // Hygiene and sanitation. 2008. № 2. Pp. 52-54.
12. Rusanova, E. V., Maslennikova L. L. Safe disposal of waste of increased radioactivity/ // Innovative technologies in construction and geoecology: Materials of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, June 30, 2015 / St. Petersburg State University of Railways named after Emperor Alexander I, Department "Engineering Chemistry and Natural Science." Moscow: Sputnik+ Publishing House LLC, 2015. Pp. 98-100.

Научный подход к решению проблемы биодеградации бетонных конструкций

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0010>

Номер статьи: C0010

Байдарашвили Марина Михайловна

канд. техн. наук, доцент

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Инженерная химия и естествознание», доцент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1675-6264

marika-spb@rambler.ru

Богачева Инна Валерьевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Инженерная химия и естествознание», аспирант

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 7209-2075

bogacheva2021@yandex.ru

Статья получена: 30.10.2025. Одобрена: 18.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Рассмотрен способ защиты строительных конструкций и сооружений от биодеградации плесневыми грибами, который учитывает потенциальные возможности самой строительной системы, и на этой основе позволяет решать геоэкологические задачи сохранения природных минеральных ресурсов вследствие повышения биостойкости, а значит, и долговечности строительных объектов. Показано, что пористая структура бетона и термодинамически обоснованные процессы взаимодействия его компонентов с соединениями меди и никеля определяют фунгицидную стойкость таких строительных систем. Показана возможность использования фунгицидных соединений в качестве химической добавки в бетонную смесь на этапе производства бетона и в ходе эксплуатации готового строительного объекта.

Ключевые слова: строительные системы, фундаментальные свойства, термодинамический расчет, ионы тяжелых металлов, биодеструкторы, фунгицидная добавка.

Scientific approach to solving the problem of concrete structures biodegradation

Baydarashvili Marina Michaylovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of engineering chemistry and natural science

Saint Petersburg, Russian Federation

marika-spb@rambler.ru

Bogacheva Inna Valерьевна

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of engineering chemistry and natural science, graduate student
Saint Petersburg, Russian Federation
bogacheva2021@yandex.ru

Abstract. This article examines a method for protecting building structures and facilities from mold biodegradation. This approach takes into account the potential of the building system itself and addresses geoecological challenges related to preserving natural mineral resources. Natural resource conservation is achieved by increasing the biostability of building structures. It has been shown that the fungicidal resistance of building systems is ensured by the porous structure of concrete and thermodynamically substantiated processes of interaction of concrete components with copper and nickel compounds. The possibility of using fungicidal compounds as a chemical additive in concrete mixture at the stage of concrete production and during operation of the finished construction project is demonstrated.

Keywords: building systems, fundamental properties, thermodynamic calculations, heavy metal ions, biodestructors, fungicidal additives

Строительная отрасль сегодня остро нуждается в научном обосновании и практической реализации геоэкологических подходов на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов, включая проектирование, строительство и эксплуатацию зданий и сооружений. Такой подход обусловлен мощнейшей индустриализацией, охватившей все страны мира, которая привела к значительному снижению продуктивности природных ресурсов и, как следствие, природно-техногенной среды. При этом, требуются не простые природозащитные мероприятия, а научный, теоретический подход к решению проблем, породивших угрозу окружающей среде. Так, геоинженерные решения могут быть реализованы на основе определенных процессов, происходящих в гидросиликатных системах в виде конструкций, сооружений или их совокупности.

В научных трудах Л. Б. Сватовской и ее учеников [1-5] разработанные методы защиты природно-техногенной среды основываются на фундаментальных свойствах строительных гидросиликатных систем, к которым отнесены способность к самопроизвольному поглощению растворов различной природы за счет пористой структуры таких систем и дальнейшему взаимодействию компонентов гидросиликатной системы с поглощенными средами, термодинамическая возможность которого была определена. Если в качестве раствора выступает раствор подвижной формы тяжелого металла, являющейся токсичной для геосреды, то строительные объекты из бетона могут выступать в качестве минеральных геоантидотов, что было экспериментально доказано в работах ученых под руководством Л. Б. Сватовской [1-5]. Важно отметить, что детоксикационная способность строительных систем цементной природы имеет научное обоснование в виде термодинамического расчета, показавшего возможность самопроизвольного протекания реакции взаимодействия компонентов бетона с ионами тяжелых металлов (ИТМ) (Таблица 1), а потому детоксикация геосреды может быть осуществлена за счет собственных энергетических резервов строительной системы, без привлечения дополнительных энергозатрат извне.

Таблица 1

Термодинамический прогноз процесса взаимодействия

компонентов строительной системы с ИТМ

Примеры процессов взаимодействия ИТМ с составляющими строительной системы	ΔG_{298}° процесса, кДж
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{т}) + \text{Cu}^{2+}\text{aq} + 2\text{OH}^{\text{aq}} + 1,17\text{H}_2\text{O}(\text{ж}) \rightarrow 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot1,17\text{H}_2\text{O}(\text{т}) + \text{Cu}(\text{OH})_2(\text{т})$	-120,56
$5\text{CaO}\cdot6\text{SiO}_2\cdot5,5\text{H}_2\text{O} + \text{Cu}^{2+}\text{aq} + 2\text{OH}^{\text{aq}} + 5\text{H}_2\text{O}(\text{ж}) \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2(\text{т}) + 5\text{CaO}\cdot6\text{SiO}_2\cdot10,5\text{H}_2\text{O}(\text{т})$	-120,63

В продолжение идеи Л. Б. Сватовской об использовании термодинамически обоснованной реакции взаимодействия ИТМ с компонентами строительной системы на цементной основе в детоксикационных целях нами была определена возможность применения данной реакции при решении проблемы повреждения зданий и сооружений, находящихся в условиях биологически агрессивной среды.

В эпоху стремительного развития технологий и урбанизации вопрос обеспечения долговечности и сохранности зданий и сооружений приобретает особую актуальность. Бетон как строительный материал имеет ряд особенностей, таких как гигроскопичность, пористость, кислотонеустойчивость, что делает этот материал «привлекательным» для организмов-биодеструкторов. К биологическим агентам, вызывающим биологическую коррозию, относятся представители разных систематических групп живых существ (Рис. 1): бактерии, грибы, лишайники, водоросли, высшие растения, беспозвоночные и позвоночные животные.



Рис. 1. Многообразие биодеструкторов строительных материалов

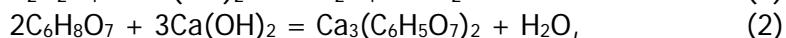
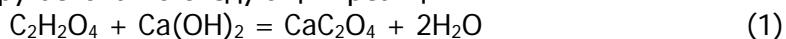
Наиболее значимыми агентами деградации строительных конструкций являются плесневые грибы или микромицеты. Грибы (Fungi, или Mycota) — гетеротрофные организмы, источником углерода для них служат готовые органические вещества. Среди грибов значительная группа использует для питания углеродсодержащие органические

соединения, которые могут входить в состав строительных материалов, например, бетона, при их модификации комплексными добавками на органической основе, например, суперпластифицирующими добавками на основе поликарбоксилатных полимеров. Кроме того, источником органических веществ могут служить различного рода загрязнения, попадающие на материалы.

Разрушение природных и искусственных каменных материалов, в том числе бетона, можно связать с жизнедеятельностью микроскопических плесневых грибов (микромицетов). Микромицеты развиваются везде, где есть минимальные условия для их существования. Высокая деструктивная активность плесневых грибов связана с их уникальной способностью адаптироваться к различным по природе материалам [6]. Основным условием, способствующим развитию плесневых грибов на бетонных конструкциях, является вода, которая выступает решающим фактором роста и накопления биомассы, а также органические вещества. В процессе своей жизнедеятельности микромицеты разрушают сформированную структуру строительного материала, что снижает его прочностные характеристики и ведет к разрушению конструкции, а также провоцируют ряд серьёзных заболеваний человека (микозы, астму, пневмонию).

Анализ литературных источников [7-9] позволяет утверждать, что разрушающее воздействие микромицетов на строительные материалы гидросиликатной природы обусловлено агрессивным влиянием метаболитов (продуктов жизнедеятельности) грибов, к которым относятся органические карбоновые кислоты и ферменты. В результате исследований [10] установлено, что для бетона агрессивной является концентрация органических кислот от 0,05 г/л.

Основное негативное воздействие на бетоны оказывают щавелевая (1) и лимонная (2) кислоты, которые разрушают гидроксид кальция, образующийся при твердении бетона в результате реакции гидратации трёхкальциевого силиката, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, и формирующий структуру бетона по следующим реакциям:



что приводит к разрушению сформированной структуры бетона.

Органические кислоты понижают pH на поверхности бетона или других строительных материалов, повышая, таким образом, агрессивность среды и стимулируя процессы биодеструкции. Кроме того, карбоновые кислоты, выделяемые микромицетами, служат источником питания для других видов микроорганизмов. Особенно существенный негативный вклад вносят ферменты микроорганизмов в процесс низкотемпературной деструкции строительных материалов.

По результатам исследований [7-10] наибольшую опасность для строительных бетонных сооружений представляют плесневые грибы *p. Aspergillus* и *p. Penicillium* (Рис. 2), которые являются наиболее активными биодеструкторами строительных конструкций.

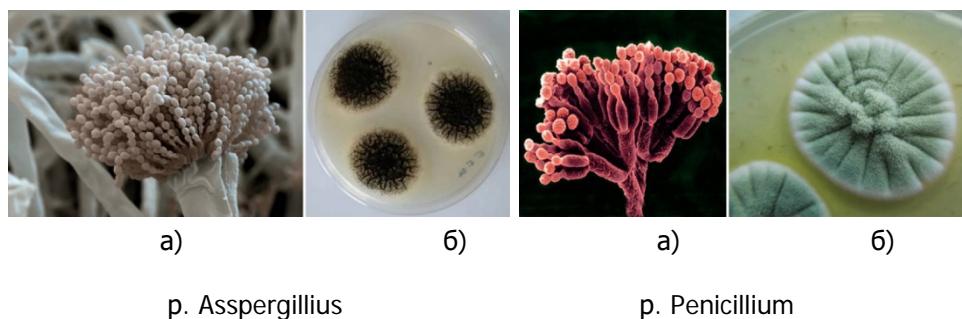


Рис. 2. Микрофотографии (а) и колонии (б) представителей плесневых грибов *p. Aspergillus* и *p. Penicillium*

Для получения культур плесневых грибов *p. Penicillium* и *p. Aspergillus* нами использовалась готовая питательная среда Сабуро органического происхождения. Посев

воздушной микрофлоры на питательную среду проводился в соответствии с общепринятой методикой культивирования микроорганизмов. На поверхности питательной среды на 3-и сутки появились видимые невооруженным глазом колонии плесневых грибов, идентифицированные как представители р. *Penicillium* и р. *Aspergillus* согласно определителю Курсанов А. И.³ (Рис. 3).

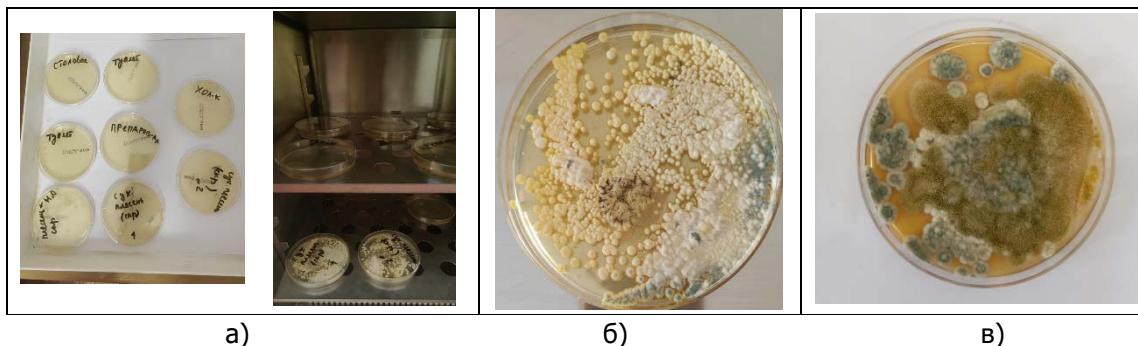


Рис. 3. Микрофлора воздуха:

- а) культивирование плесневых грибов в термостате;
- б) колонии плесневых грибов на 3 сутки культивирования;
- в) колонии плесневых грибов на 5 сутки культивирования

Одним из наиболее перспективных и высокоэффективных способов защиты бетонных конструкций от биоразрушения, вызванного плесневыми грибами, является применение биоцидных, а именно фунгицидных, добавок. Эти химические агенты могут быть интегрированы в состав строительных материалов на стадии их производства или же введены в уже готовые бетонные конструкции посредством метода поверхностной пропитки при осуществлении ремонтно-восстановительных работ.

В качестве потенциальных противогрибковых компонентов были рассмотрены нитраты меди (II) и никеля (II). Их выбор обусловлен двумя причинами. Первая заключается в том, что соединения меди (II), активно применяемые в аграрной практике, характеризуются выраженными фунгицидными свойствами. Кроме того, хлорид никеля демонстрирует значительные антибактериальные характеристики. При этом данные соединения обладают простой структурой и высокой химической активностью, что позволяет использовать их в малых количествах. Вторая причина заключается в самопроизвольной реакции взаимодействия ИТМ с компонентами бетона, которая была термодинамически предсказана и экспериментально подтверждена, о чем говорилось выше. В таком случае, фунгицидная добавка, включенная в состав бетонной смеси, при условии сохранения эксплуатационных характеристик полученного бетона будет оказывать противогрибковое действие, с одной стороны, и, будет при этом безопасной для геосреды за счет образования труднорастворимых соединений меди (II) и никеля, с другой.

Проведенные исследования (Рис. 4) доказали наличие фунгицидной активности растворимых солей меди (II) и никеля (II) по отношению к плесневым грибам на питательной среде агар Сабуро. В чашках Петри, где среда пропитана 5% раствором нитрата меди (II) и 0,5% раствором нитрата никеля (II), развития колоний плесневых грибов на 3 сутки не наблюдается в отличие от контрольного образца. Учитывая выраженные фунгицидные свойства нитрата меди (II) и никеля (II), представляется целесообразным их интеграция в состав бетонной смеси для повышения биостойкости материала.

³ Курсанов А. И. Пособие по определению грибов из родов *Aspergillus* и *Penicillium*. М.: Медгиз, 1947. 116 с.



Рис. 4. Определение фунгицидного действия подвижных форм меди Cu(II) и никеля Ni(II):

- а) контрольный образец — дистиллированная вода;
б) 5% раствор Cu(NO₃)₂; в) 0,5% раствор Ni(NO₃)₂

Для предотвращения биокоррозии, вызванной плесневыми грибами, эффективно также применять внешнюю обработку бетонных поверхностей с использованием соединений меди и никеля. Данный подход демонстрирует высокую эффективность в ингибировании биологических процессов разрушения. Применение растворимых соединений меди и никеля обусловлено их способностью образовывать на поверхности бетона хелатные комплексы, которые блокируют метаболические пути патогенных микроорганизмов, предотвращая их размножение и деструктивную активность. Целесообразно также включать в состав средств для внешней обработки бетонных конструкций гидрофобные добавки. Эти добавки создают гидроизоляционный барьер, препятствующий проникновению влаги в структуру бетона. В результате формируются неблагоприятные условия для существования и размножения плесневых грибов, что существенно снижает или исключает риск биокоррозионных процессов.

После применения фунгицидных препаратов с гидрофобными свойствами для наружной обработки бетонных конструкций целесообразно осуществить последующее нанесение ремонтно-восстановительных композитов на поверхность. Данный подход позволит обеспечить комплексную защиту материала, повышая его устойчивость к биологическому поражению и воздействию внешних факторов окружающей среды.

Таким образом, фундаментальные свойства и индивидуальные характеристики бетонных систем приобретают первостепенное значение при решении проблемы обеспечения биостойкости строительных конструкций. Комплексное исследование этих параметров позволит разработать эффективные стратегии повышения долговечности и устойчивости бетонных сооружений к биодеструктивным процессам.

Список литературы

- Сватовская Л. Б. и др. Применение инженерно-химических знаний в геоэрозионных строительных технологиях (включая нанотехнологии): монография. / Л. Б. Сватовская Л. Б., А. М. Сычева, А. В. Хитров, М. В. Шершнева, М. М. Байдарашвили, А. С. Сахарова. СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. 80 с. EDN: <https://elibrary.ru/SQJLIH>
- Сватовская Л. Б. Минеральные геоантидоты для детоксикации литосферы // Новые исследования в материаловедении и экологии: сб. науч. тр. СПб. : ПГУПС, 2012. С. 3-12.
- Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Сычева А. М., Макарова Е. И. Инженерно-химические основы прогнозирования геозащитных свойств твердых тел и новых технологий обезвреживания. СПб. : ПГУПС, 2010.
- Сватовская Л. Б., Масленникова Л. Л., Макарова Е. И., Шершнева М. В., Бабак Н. А. Инженерно-химические и естественно-научные основы создания новых эко- и геозащитных технологий. СПб. : ПГУПС. 2011. 88 с.

5. Сватовская Л.Б. Некоторые проблемы современной геоэкологии и пути их решения // Новые исследования в материаловедении и экологии: сб. науч. тр. Вып. 7. СПб. : ПГУПС, 2007. С. 3-4
6. Шаповалов И.В. Биоповреждение строительных материалов плесневыми грибами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Белгород : БГТУ, 2003.
7. Соловьева В.Я., Степанова И. В. Биологическая коррозия бетона // Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Москва, 01–02 июня 2023 года. М.: Спутник+, 2023. С. 8-11.
8. Парфенова Л. М., Вишнякова Ю. В., Шауро А. А. Биостойкость модифицированного цементного камня к плесневым грибам // Вестник Полоцкого государственного университета. 2017, № 8. С. 58-62.
9. Уряшева Н. Н. Взаимодействие микроорганизмов с каменными строительными материалами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2017. Т. 17, № 3. С. 65-71
10. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Куколева Д.А. Комплексное исследование процессов биоповреждения минеральных строительных материалов // Известия КГАСУ. 2011. № 4 (18). С. 274-281.

References

1. Svatovskaya L. B. et al. Application of engineering and chemical knowledge in geo-ecological protection construction technologies (including nanotechnology): monograph. / L. B. Svatovskaya, A. M. Sycheva, A. V. Khitrov, M. V. Shershneva, M. M. Baidarashvili, A. S. SakharovaSt. Petersburg : St. Petersburg State University of Railway Transport, 2013. 80 p.
2. Svatovskaya L. B. Mineral geoantidotes for detoxification of the lithosphere // New research in materials science and ecology: collection of scientific papers. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Railway Transport, 2012. pp. 3-12.
3. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Sycheva A.M., Makarova E. I. Engineering and chemical foundations of forecasting geoprotective properties solids and new technologies of neutralization. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Railway Transport, 2010.
4. Svatovskaya L. B., Maslennikova L. L., Makarova E. I., Shershneva M. V., Babak N. A. Engineering, chemical and natural science foundations of the creation of new eco- and geo-protective technologies. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Railway Transport. 2011. 88 p.
5. Svatovskaya L.B. Some problems of modern geoecology and ways to solve them // New research in materials science and ecology: collection of scientific papers, Issue 7. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Railway Transport, 2007. pp. 3-4
6. Shapovalov I.V. Bio-damage of building materials by mold fungi. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences – Belgorod, BSTU, 2003. p. 17.
7. Solovyova, V. Ya., Stepanova I. V. Biological corrosion of concrete // Geocochemistry of lithosphere protection : Proceedings of the IX International Scientific and Practical Internet Conference, Moscow, June 01-02, 2023. Moscow: Sputnik+, 2023. pp. 8-11.
8. Parfenova L. M., Vishnyakova Yu. V., Shauro A. A. Bio-resistance of modified cement stone to mold fungi // Bulletin of Polotsk State University, 2017. № 8, pp. 58-62.
9. Uryasheva N. N. Interaction of microorganisms with stone building materials // Bulletin of SUSU. Series "Construction and Architecture", 2017. Vol. 17, № 3. pp. 65-71
10. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Kukoleva D.A. A comprehensive study of the processes of bio-damage of mineral building materials // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2011. № 4 (18). Pp. 274-281.

Переход на многоуровневую систему контроля прочности бетона в ответственных конструкциях

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0011>

Номер статьи: С0011

Беленцов Юрий Алексеевич

д-р техн. наук,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 5155-6369

belents@mail.ru

Черепанова Дария Алексеевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, старший преподаватель кафедры «Строительные материалы и технологии», начальник отдела качества

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 8293-0859

cherepanova@pgups.ru

Статья получена: 31.10.2025. Одобрена: 18.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Рассмотрены причины, сдерживающие применение современных, в том числе высокопрочных, бетонов на практике, а также сложность идентификации высокопрочных бетонов и невысокий процент использования реальной прочности бетонов в конструкциях с учетом уровня безотказности. Сравниваются показатели прочности бетона по российским и европейским нормам с учетом минимальной и средней прочности, обеспечивающие контроль по показателю «класс прочности», предлагаются изменения минимальной прочности в системе контроля качества бетонов, основываясь на статистических методах контроля. Формулируются основные требования к современным методам контроля прочности бетона в конструкциях, учитывающие точность, широкий охват, комплексность, прецизионность. Формируются условия многоуровневой системы контроля, позволяющие обеспечить высокий уровень надежности материалов в конструкции за счет повышения качества контроля.

Ключевые слова: идентификация бетонов, методы контроля прочности, многоуровневая модель контроля качества бетонов.

Transition to a multi-level system for monitoring concrete strength in critical structures

Belentsov Yuri Alekseevich

Doctor of Technical Sciences,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Professor of the Department of Construction Materials and Technologies

St. Petersburg, Russia

belents@mail.ru

Cherepanova Daria Alekseevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Senior Lecturer of the Department of Construction Materials and Technologies, Head of the Quality Department St. Petersburg, Russia
cherepanova@pgups.ru

Abstract. The article examines the factors hindering the practical use of modern concrete, including high-strength concrete, as well as the difficulty in identifying high-strength concrete and the low utilization rate of actual concrete strength in structures, taking into account the level of failure-free performance. Concrete strength indicators according to Russian and European standards are compared, taking into account the minimum and average strengths that ensure control based on the strength class indicator. Changes to the minimum strength in concrete quality control systems based on statistical control methods are proposed. Key requirements for modern concrete strength control methods in structures are formulated, taking into account accuracy, broad coverage, comprehensiveness, and precision. The conditions for a multi-level control system are developed, ensuring a high level of material reliability in structures by improving the quality of control.

Keywords: identification of concretes, methods of strength control, and a multi-level quality control model for concretes.

Современное состояние строительной индустрии приводит к развитию строительных материалов, совершенствуется структура и свойства. Материаловедение позволяет получить эффективные строительные материалы для создания любых видов конструкции, в том числе совершенствуется бетон. Появляются новые виды бетонов: фибробетоны, самоуплотняющиеся, светопрозрачные и т.п. Но их применение на практике сдерживается несовершенством системы контроля. Создав материал с заданными свойствами, при применении не гарантируется его эффективное применение на практике. В конструкциях для материалов не всегда возможно проконтролировать полный комплекс свойств. Например, применение высокопрочных бетонов В90 и В100 достижимо практически, но эффект их использования значительно снижается из-за несовершенства системы контроля и требований обеспечения надёжности [1]. При этом система контроля прочности даже при выполнении требований дает некоторое количество сбоев, приводящих к отказам и авариям [2,3].

Можно выделить несколько важных причин. Первая находит отражение при проектировании и в процессе строительства, например, закладываются значительные коэффициенты запаса $K_{зап}$ бетонов, для гарантии безотказности материала в конструкции⁴. Поэтому используется лишь небольшая доля прочности бетона. Например, для бетона класса В100 требуемый показатель средней прочности по результатам испытания (\bar{R}) должен составлять 128 МПа (при коэффициенте вариации $v=0,13$), а минимальное единичное значение прочности (R_{min}) должно быть выше класса (В) и составляет соответственно 100 МПа. При этом, прочность по первой группе предельных состояний составит R_b составляет 47,5 МПа [4]. Коэффициент запаса составит $K_{зап}=2,7$ (128:47,5), в абсолютных величинах при прочности по первой группе предельных состояний $R_b=47,5$ МПа запас составит 81 МПа, что на 172 % больше расчётной величины. Причем, чем выше класс бетона, тем меньше эффективность использования прочности бетонов. На Рис. 1. представлена зависимость доли использования расчетной прочности от фактической при различных коэффициентах вариации (v) по российским нормативам.

⁴ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

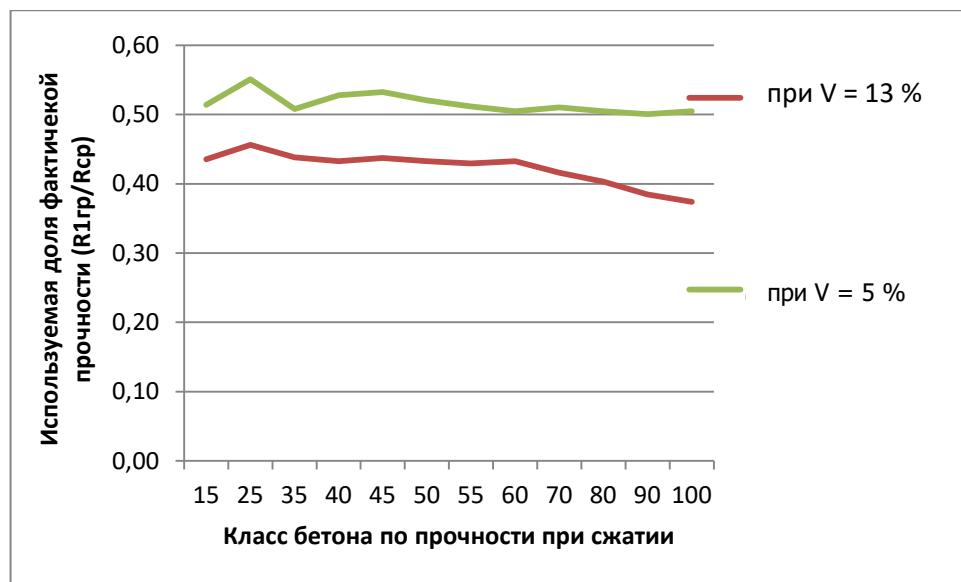


Рис. 1. Зависимость доли использования расчетной прочности от фактической при различных коэффициентах вариации V

Вторая составляющая, которая не позволяет однозначно идентифицировать показатели качества бетонов, например, сравнивая бетон В90 и 100 при отличающихся показателях минимальной R_{min} и средней прочности \bar{R} , это то, что диапазон возможных значений прочности для каждого класса пересекается на 67 % (Рис. 2) [4].

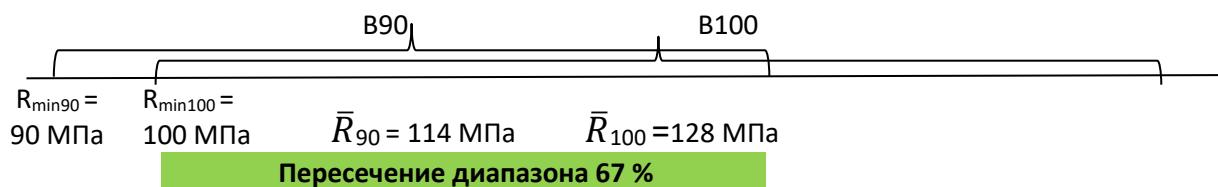


Рис. 2. Пересечение диапазона возможных значений прочности для классов бетона В90 и В100

При использовании требования к минимальной прочности о том, что она равняется классу ($R_{min}=B$), средняя прочность (\bar{R}) зависит от коэффициента вариации и схемы испытания, определяется формулой (1) и не даёт возможности эффективно принять решение о качестве бетона. Необходимы новые подходы для совершенствования методов проектирования контроля бетонных конструкций.

$$B = \bar{R} \cdot (1 - 1,64 \cdot V), \quad (1)$$

где B — класс бетона по прочности; \bar{R} — среднее значение временного сопротивления бетона сжатию, установленное при испытании стандартных кубов; V — коэффициент вариации прочности бетона в партии.

Рассмотрим вероятностную статистическую оценку прочности для оценки класса по прочности (Рис. 3).

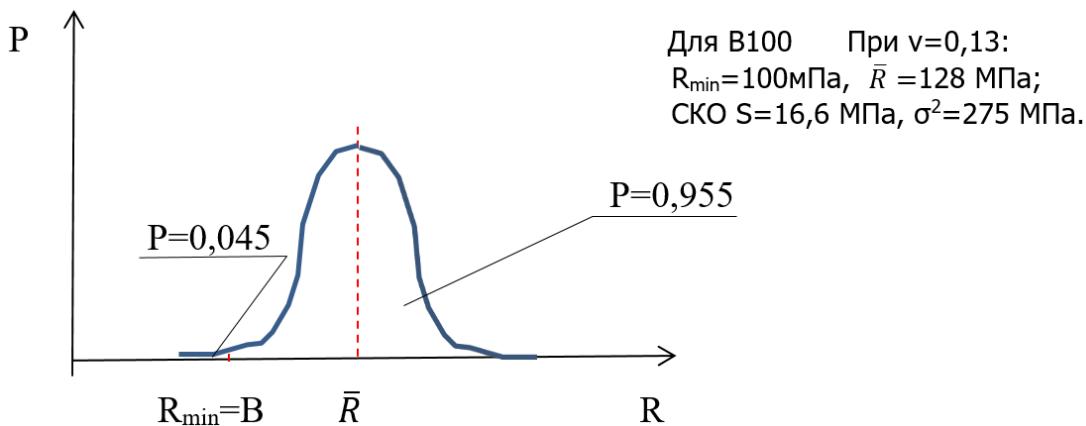


Рис. 3. Нормальный закон распределения прочности бетона B100 при коэффициенте вариации $v=0,13$

Должно одновременно выполняться два условия для класса B:

- $R \geq B$ с вероятностью $P=95\%$;
- $R_{min} \geq B$ с вероятностью $P=100\%$.

Совместное выполнение этих двух условий становится не всегда возможным. В результате требования обеспечения показателей средней минимальной прочности при коэффициенте вариации $v=0,13$ не может быть выполнено. Для выполнения условий необходимо, что бы R_{min} назначалась на основании вероятностного подхода, заложенного в статистическом контроле качества по количественному признаку⁵.

В европейских нормах заложено выполнение следующих двух условий (2), (3):

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 4 \text{ или } f_{cm} \geq f_{ck} + 1,480\sigma \quad (2)$$

$$f_{ci} \geq f_{ck} - 4, \quad (3)$$

где f_{ck} — класс бетона, прочность бетона, равная классу, МПа; σ — стандартное отклонение; f_{cm} — среднее значение «п» испытаний, МПа; f_{ci} — любой частный результат, МПа.

Для выполнения условия, чтобы прочность была больше класса с вероятностью 95 %, по европейским нормативам для класса С95/105 в образцах кубиках любой частный результат прочности (f_{ci}) должен быть не меньше 101 МПа, а средняя прочность (f_{cm}) не меньше 113 МПа. Соответственно, стандартное отклонение при коэффициенте вариации 15 %, допустимом в европейских нормах, составит 16,9 МПа, а дисперсия (σ^2) — 286 МПа. Тогда вероятность события, что прочность будет меньше допустимого значения при нормальном законе распределения (P), составит 23 %. Для того, чтобы обеспечить требуемую вероятность по российским и европейским нормам для сопоставимых или близких классов С105 и B100, несоответствие заявленного условия. Это отражает принципиальную разницу между российским и европейским подходом в обеспечении требований надёжности и долговечности. Разница принципиальных подходов позволяет оценить насколько эффективно использование методов контроля.

Исходя из сказанного при использовании бетона в зависимости от риска поставщика и потребителя необходимо изменить показатели минимальной прочности [4]. Если при статистических расчётах взять коэффициент вариации $v=13\%$, количество образцов $n=6$ и минимальный уровень доверия к поставщику Т2, то альтернативное значение минимальной прочности образца в серии для класса B100 (R_{min}) составит 91 МПа [4]. Тогда будут выполняться оба условия для класса с достоверностью $P=95\%$. При этом вероятность

⁵ ГОСТР 50779.76-2018 (ИСО 39511:2018) Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по количественному признаку. Планы последовательного контроля для процента несоответствующих единиц продукции.

отказа будет достаточно малой $P=10^{-4}$, как заложено в требованиях европейских норм⁶ [5]. Для эффективного использования современных высокотехнологичных и эффективных бетонов необходим пересмотр системы контроля, т.к. существующие методы не всегда могут обеспечить эффективность и точность контроля. В европейских нормах заложено, что самые точные разрушающие методы контроля показывают результаты сходимости и воспроизводимости для образцов-кубиков 150 мм $S_r=3.2\%$ и $SR=5,4\%$ ⁷.

Для того чтобы обеспечить высокий уровень контроля и требования надёжности современных конструкций нужна многоуровневая система контроля показателя качества материалов. Основы заложены в нормативах, определяющих качество высокопрочных бетонов (ГОСТ 31914), включая:

- контроль однородности по косвенным показателям;
- контроль прочности, включая прямые разрушающие, прямые неразрушающие, косвенные неразрушающие методы;
- контроль остальных физико-механических показателей, влияющих на надёжность и долговечность.

Достоинства и недостатки каждого метода приведены в Таблице 1.

При этом самые точные разрушающие методы дают погрешность порядка 5 %, что при низком охвате и недостаточной точности не позволяет эффективно гарантировать высокое качество высокопрочных бетонов. Это приводит к возможности локальных выбросов с возможностью создания «слабых мест» в опасных зонах конструкции с низкой прочностью, что приводит к опасности отказов конструкций. Обеспечение надёжности проектируемых и возводимых, эксплуатируемых конструкции подразумевает их «разрушимость» с требуемой долей вероятности. Даже при выполнении требований нормативов отказ и авария возможны с ненулевой вероятностью. Это происходит при неблагоприятном стечении обстоятельств: плохое качество материалов, низкая культура производства, технологические нарушения, превышение нагрузок в процессе эксплуатации.

Система контроля прочности и остальных физико-математических свойств должна обеспечивать значительный уровень информационной избыточности для компенсации несовершенства технологии бетона, строительства и контроля качества. Информационные избыточность современных методов контроля заключается в использовании нескольких независимых источников информации о параметре качества, например, прочности бетона. С точки зрения развития методов контроля и проектирования необходимо учитывать свойства материалов и конструкций. Основные требования к современным методам контроля прочности бетона в конструкциях должны подразумевать следующие факторы:

- точность: низкая погрешность методов контроля;
- широкий охват: возможность локализовать «слабые места» материала в конструкциях, во всём объёме;
- комплексность: контроль необходимо вести по всем показателям и параметрам, влияющим на надёжность и долговечность, прямо или косвенно (плотность, водонепроницаемость, морозостойкость, наличие дефектов и д.р.);
- прецизионность: обеспечение сходимости и воспроизводимости результатов контроля — гарантия возможности повторить результат в тех же или в других условиях (как заложено в европейских нормах при проектировании ответственных конструкций из бетона)

⁶ Implementation of Eurocodes. Handbook 2. Reliability Backgrounds. Development of skills facilitating implementation of eurocodes. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Prague, 2005, 254 p. URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-12/handbook2.pdf>

⁷ DIN EN 12390-3-2019 Испытания затвердевшего бетона. Часть 3. Прочность на сжатие испытательных образцов. 01 октября 2019.

Таблица 1

Сравнение методов контроля прочности бетона

Группа методов	Метод	Достоинства	Недостатки
Разрушающий на стандартных образцах	Испытание образцов-кубов или цилиндров на прессе	Высокая точность, прямой метод, эталон	Локальность, не на конструкции, запаздывание результата, влияние отличия условий твердения образцов и конструкций,
Разрушающий на образцах отобранных из конструкций, кернах	Испытание образцов-кубов или цилиндров на прессе	Высокая точность, прямой метод, эталон, учитывает условия твердения в конструкции	Локальность, запаздывание результата, влияние изменения поверхности при отборе из конструкции, от направления испытания
Неразрушающие прямые	Отрыв со скальванием	Наиболее точный из неразрушающих, привязан к эталону, учитывает условия твердения в конструкции	Повреждает поверхность, трудоемкость, локальность, ниже точность от разрушающих
	Скальвание ребра	точность, прямо на конструкции, учитывает условия твердения в конструкции	Может повредить угол конструкции, влияние арматуры арматура, локальность
Неразрушающие косвенные	Ультразвуковой (УЗ)	Высокая проникающая способность, карта неоднородности, трудоемкость, охват конструкции, учитывает условия твердения в конструкции	Низкая точность, сильно зависит от влажности, арматуры, от качества поверхности требует градуировки
	Ударный импульс	Простота, скорость, портативность, охват, учитывает условия твердения в конструкции	Низкая точность, зависит от состояния поверхности, карбонизации, жесткости, зависит от твердости и качества поверхности
Ускоренные испытания	Испытание образцов-кубов после термообработки	Прочность через 1-2 суток, Быстрый прогноз проектной прочности	Низкая точность, стоимость, требует специального оборудования, не учитывает условия твердения в конструкции

Контроль качества должен включать выполнение следующих этапов:

- 1) контроль однородности смеси (однородность, консистенция, подвижность, В/Ц, В/Т, водоудерживающая способность и т.д.)
- 2) контроль укладки и транспортировки бетонной смеси, который обеспечит выполнение условий однородности;
- 3) контроль условий набора прочности, поскольку существует значительная значительное различие бетонов разных условиях. Например, в условиях электропрогрева, жаркого климата, замораживания, в нормальных условиях;

4) контроль однородности зрелого бетона в конструкциях с помощью ультразвуковых, ударно-импульсных и других методов косвенного неразрушающего контроля;

5) многоуровневая модель контроля показателей прочности бетона, включающая комплекс использования прямых и косвенных методов, обеспечивающих достаточную точность и полный охват, включая возможные «слабые места», выявленные на предыдущих этапах. Задача данного уровня создать информационную избыточность системы контроля обеспечить высокую точность контроля прочности;

6) контроль показателей физико-механических, влияющих на надежность и долговечность (плотность, морозостойкость, водонепроницаемость и т.д.).

При современном подходе к системе контроля качества бетона необходимо создавать достаточную информационную избыточность в системе контроля. Это позволит гарантировать качество, а значит надёжность и долговечность возводимых конструкций из разных видов бетона.

Список литературы

1. Беленцов Ю.А., Черепанова Д.А. Влияние методики контроля качества бетона по физико-механическим показателям на надежность строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2023. № 5/6 (619). Стр. 25-31.
2. Beal, A.N. Concrete strength testing — are the code writers getting it right? // The Structural Engineer. 19 May 2009. 87 (10). P. 73-80.
3. Neville A. M. Core Tests: easy to perform, Not to easy interpret // Concrete international. November 2001. P. 57-68.
4. Комов В. М., Беленцов Ю. А., Черепанова Д.А. // Актуальные проблемы естественных и технических наук. Сборник статей межвузовской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 234-244.
5. Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в Еврокоде // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. 2014. № 6. С. 79-88.

References

1. Belentsov Yu.A., Cherepanova D.A. Influence of the methodology for monitoring concrete quality by physical and mechanical properties on the reliability of building structures. // Concrete and Reinforced Concrete. 2023. No. 5/6 (619). Pp.: 25-31.
2. Beal, A.N. Concrete strength testing — are the code writers getting it right? / The Structural Engineer, 87 (10), 19 May 2009. Pp. 73-80.
3. Neville A.M. Core Tests: easy to perform, not to easy to interpret / concrete international / November 2001. Pp. 57-68.
4. Komov V.M., Belentsov Yu.A., Cherepanova D.A.. Current Issues in Natural and Technical Sciences. // Collection of Articles from the Interuniversity Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2023. pp. 234-244.
5. Lantukh-Lyaschenko A. I.. Reliability Concept in Eurocode. // Bridges and Tunnels: Theory, Research, and Practice. 2014. No. 6. pp. 79-88.

Влияние структуры цементно-песчаной матрицы на прочность защитных сооружений при воздействии обычных средств поражения

УДК 699.852.7

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0012>

Номер статьи: C0012

Каменев Юрий Александрович

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3053-8640

kamenev.vka@mail.ru

Павлюк Александр Юрьевич

Главный испытательный космический центр имени Г.С. Титова,
Краснознаменск (Московская область), Россия

sasha.pavlyuk.95@inbox.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
адъюнкт

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg@gmail.ru

Карасев Сергей Юрьевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 6879-6416

vka@mil.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 26.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Цель статьи — определение зависимости напряжений на поверхности плиты покрытия специального сооружения при воздействии взрыва, параметров защитной конструкции, модифицированной цементно-песчаной матрицей. Важными аспектами этой работы являются геометрические характеристики ауксетической структуры, а также прочностные свойства бетонного композита, который представлен классами прочности В30, В45 и В60. В качестве методов использовались численное моделирование, статистический анализ и планирование эксперимента в программном комплексе ANSYS Explicit Dynamics, где цементно-песчаная матрица описывалась критерием прочности Друкера-Прагера. В ходе исследования установлено, что защитные конструкции с круглыми и квадратными пустотами не способны обеспечить защиту плиты покрытия специального сооружения при воздействии взрыва. Напротив, плиты с ауксетической конструкцией продемонстрировали свою эффективность, значительно поглощая энергию при взрывных воздействиях. При расчете для 27 разных комбинаций факторов в ANSYS Explicit Dynamics получены напряжения в плите покрытия, варьирующиеся от 22 до 81 МПа. На основе этих данных был выполнен регрессионный анализ, позволивший построить математическую модель в виде полиномиального уравнения второй степени. Эта модель объединяет уровень

напряжений (Y) с тремя ключевыми факторами: отношением площади ячейки к системе (X_1), отношением площади пустоты к материалу (X_2) и прочностью бетона (X_3). Адекватность полученной модели была подтверждена критерием Фишера, где расчетное значение F ($F_{\text{расч}}=19,0811$) выше табличного значения ($F_{\text{табл}}=1,9881$). Это свидетельствует о способности модели адекватно описывать исследуемый процесс. Созданная регрессионная модель позволяет более точно подбирать параметры энергопоглощающих конструкций на этапе их проектирования. Установление оптимальных геометрических параметров ауксетической конструкции предоставляет возможность для разработки защитной конструкции, которые основательно повышают стойкость специального сооружения к взрывным воздействиям, что способствует увеличению живучести значимых объектов и снижению ущерба от динамических нагрузок.

Ключевые слова: напряжения, плита покрытия специального сооружения, защитная конструкция, цементно-песчаная матрица, ауксетическая конструкция, математическое моделирование, регрессионный анализ, уравнение регрессии, критерий Фишера, динамическое воздействие, оптимизация параметров.

The effect of the cement-sand matrix structure on the strength of protective structures under the influence of conventional weapons

Kamenev Yuri Alexandrovich

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
lecturer
Saint Petersburg, Russia
kamenev.vka@mail.ru

Pavlyuk Alexander Yurievich

G.S. Titov main test space center
Moscow region, Krasnoznamensk
sasha.pavlyuk.95@inbox.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
adjunct
Saint Petersburg, Russia
nesterovoleg248@gmail.com

Karasev Sergey Yurievich

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky
Saint Petersburg, Russia
vka@mil.ru

Abstract. Objective of the article is to determine the dependence of stresses on the surface of the coating plate of a special structure under the influence of an explosion, the parameters of the protective structure modified with a cement-sand matrix. Important aspects of this work are the geometric characteristics of the auxetic structure, as well as the strength properties of the concrete composite, which is represented by strength classes B30, B45 and B60. The study used the following methods: numerical modeling, statistical analysis and experimental planning in the ANSYS Explicit Dynamics software package, where the cement-sand matrix was described by the Drucker-Prager strength criterion. The study found that protective structures with round and square voids are not able to protect the coating plate of a special structure when

exposed to an explosion. On the contrary, plates with auxetic construction have demonstrated their effectiveness, significantly absorbing energy during explosive impacts. When calculating for 27 different combinations of factors, ANSYS Explicit Dynamics obtained stresses in the coating plate ranging from 22 to 81 MPa. Based on these data, regression analysis was performed, which made it possible to construct a mathematical model in the form of a polynomial equation of the second degree. This model combines the stress level (Y) with three key factors: the ratio of the cell area to the system (X_1), the ratio of the void area to the material (X_2) and the strength of the concrete (X_3). The adequacy of the obtained model was confirmed by the Fisher criterion, where the calculated value of F ($F_c = 19.0811$) is higher than the tabular value ($F_t = 1.9881$). This indicates the ability of the model to adequately describe the process under study. The created regression model makes it possible to more accurately select the parameters of energy-absorbing structures at the design stage. The establishment of optimal geometric parameters of an auxetic structure provides an opportunity to develop protective structures that significantly increase the resistance of a special structure to explosive impacts, which helps to increase the survivability of significant objects and reduce damage from dynamic loads.

Keywords: stresses, coating plate of a special structure, protective structure, cement-sand matrix, auxetic structure, mathematical modeling, regression analysis, regression equation, Fisher criterion, dynamic impact, optimization of parameters.

Введение

Данное научное исследование представляет собой сравнительный анализ эффективности различных типов защитных конструкций (ЗК) для специальных сооружений (СС) от взрыва. В рамках работы были смоделированы ЗК, основанные на цементно-песчаной матрице (ЦПМ) с классами прочности В30, В45, В60, где ЦПМ описывалась критерием прочности Друкера-Прагера [1], ауксетическая структура [2-9], а также структуры с квадратными и круглыми пустотами, что иллюстрируется на Рис 1.

Основной целью анализа стала оценка способности ЗК к энергопоглощению [4,9], что является важным для обеспечения безопасности СС в условиях действия взрывов. В ходе проведенного анализа выяснилось, что, несмотря на то, что геометрические параметры ауксетических пустот [3] имеют относительно низкие показатели прочности по сравнению с пустотами круглой и квадратной формы, их деформативность оказывается ключевым фактором, способствующим повышению значения энергопоглощения.

Это открытие позволило с высокой степенью уверенности проводить математическое моделирование и анализ функциональных характеристик ЗК, выполненных из композитных материалов на основе измененной ЦПМ.

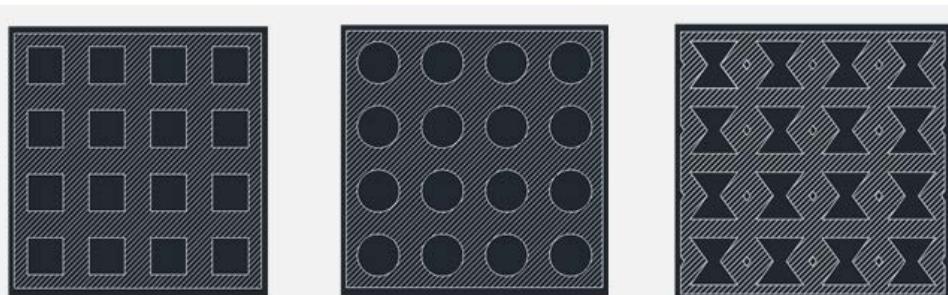


Рис. 1. Модифицированная ЦПМ: а) с квадратными пустотами, б) с круглыми пустотами, в) с ауксетической возвратно-вогнутой структурой

На данном этапе было установлено, что традиционные решения плит с круглыми (Рис. 2, г) и квадратными пустотами (Рис. 2, в), а также с воздушной прослойкой (Рис. 2, б), не гарантируют требуемого уровня защиты, приводя к полному пробитию плиты покрытия и уничтожению несущих конструкций.

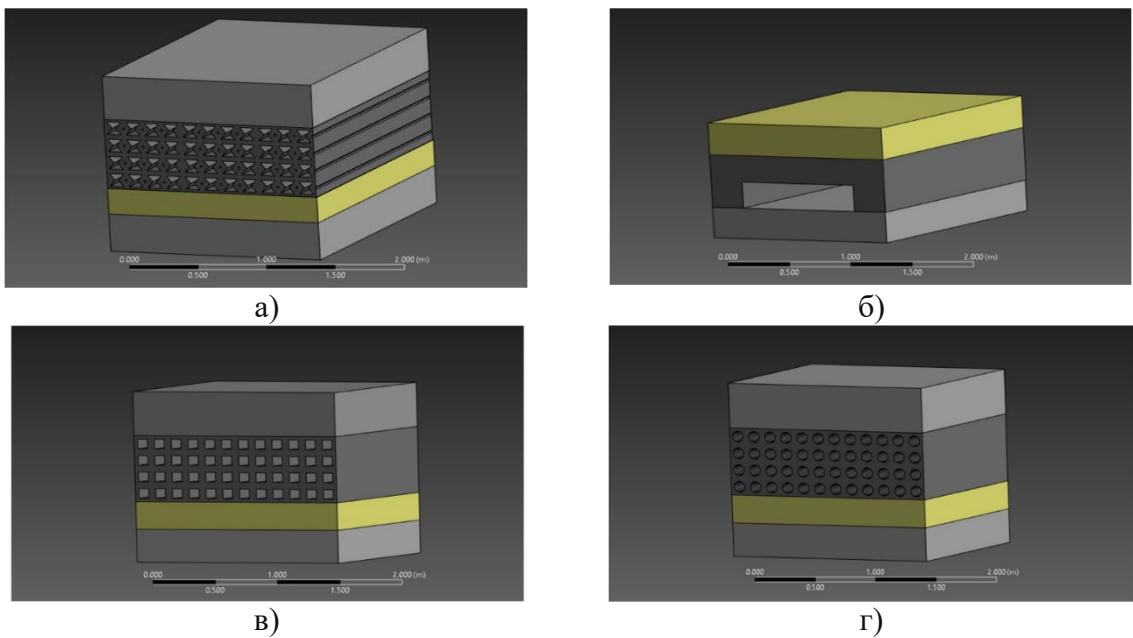


Рис. 2. Вид защитной конструкции: а) с ауксетической структурой, б) с невесомой прослойкой, в) с квадратными пустотами, г) с круглыми пустотами

В то же время была испытательно подтверждена высокая эффективность защитных плит с ауксетической конструкцией (Рис. 2, а), которые за счет уникальной геометрии ячеек демонстрируют способность эффективно поглощать энергию взрыва, сохраняя целостность основной системы [9]. Преимущество ауксетических структур [3] определило необходимость более основательного изучения влияния их геометрических и физико-механических параметров на напряженно-деформированное состояние ЗК (Рис. 3).

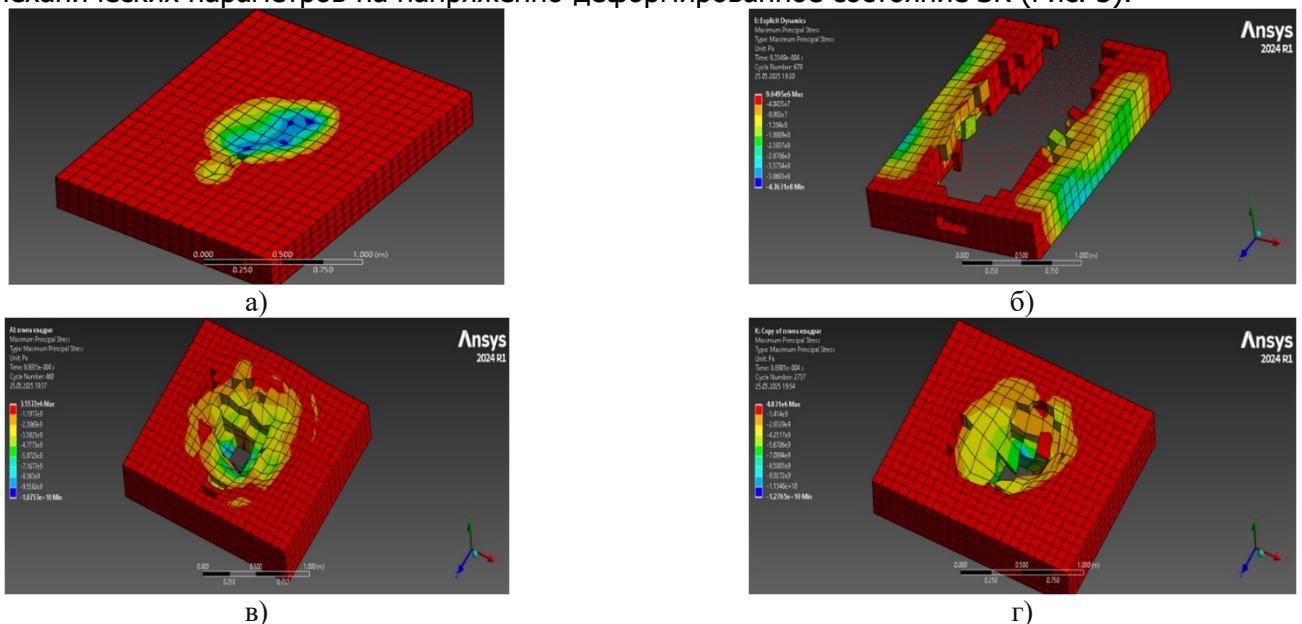


Рис. 3. Результат воздействия взрыва на плиту СС:
а) при ЗК с ауксетической структурой, б) при ЗК с воздушной прослойкой,
в) при ЗК с квадратными пустотами, г) при ЗК с круглыми пустотами

С использованием численного моделирования в программном комплексе ANSYS Explicit Dynamics была совершена оценка напряженно-деформированного состояния защитной плиты и плиты покрытия. Это позволило получить результаты, которые показывают, что существующие ЗК не обеспечивают необходимую защиту. В частности, плита покрытия СС оказывается полностью пробитой ударной волной, образующейся в результате взрыва.

Для достижения цели исследования был применен методы математического моделирования, включающий экспериментальное планирование. Это позволяет оценить влияние различных факторов на эффективность ЗК. Были изучены такие параметры, как отношение площади ячеек к конструкции (обозначаемое как $X_1 = S_y/S_k$), отношение площади пустот к площади материала ($X_2 = S_p/S_m$) и прочность бетона (X_3). На основе данных, полученных в ходе моделирования в ANSYS Explicit Dynamics, был проведен регрессионный анализ с целью создания математической модели. Значимость результатов была установлена с применением критерия Фишера. Это позволяет уверенно говорить о достоверности полученных значений. В результате анализа удалось не только установить аналитическую связь, но и определить оптимальные геометрические параметры ауксетической структуры, которые минимизируют нагрузку. Это доказывает целесообразность использования таких систем для повышения защитных свойств СС, предназначенных для защиты от техногенных нагрузок.

Математическое описание зависимости напряжений, образующихся на поверхности плиты покрытия СС

В процессе математического прогнозирования с использованием ANSYS Explicit Dynamics была изучена зависимость напряжений в ауксетически модифицированной плите от влияния взрыва на геометрические параметры возвратно-вогнутой ауксетической текстуры [3] и прочностные свойства используемых конструкционных материалов. В результате были определены значения напряжений на поверхности плиты с покрытием для разных конфигураций защитной конструкции, как показано в Таблице 1.

Таблица 1
Данные математического прогнозирования динамического воздействия

<i>№ испытания</i>	X_1	X_2	X_3	Y
1	0,005	0,5	30	6,2
2	0,01	0,5	30	7,9
3	0,015	0,5	30	7,6
4	0,005	0,79	30	5,2
5	0,01	0,79	30	6,0
6	0,015	0,79	30	4,9
7	0,005	1,5	30	4,2
8	0,01	1,5	30	3,2
9	0,015	1,5	30	2,9
10	0,005	0,5	45	6,4
11	0,01	0,5	45	8,0
12	0,015	0,5	45	7,7
13	0,005	0,79	45	5,0
14	0,01	0,79	45	6,1
15	0,015	0,79	45	3,9
16	0,005	1,5	45	4,0
17	0,01	1,5	45	3,0
18	0,015	1,5	45	2,5
19	0,005	0,5	60	6,6
20	0,01	0,5	60	8,1
21	0,015	0,5	60	7,8
22	0,005	0,79	60	5,0
23	0,01	0,79	60	6,1
24	0,015	0,79	60	3,8
25	0,005	1,5	60	3,7
26	0,01	1,5	60	2,7
27	0,015	1,5	60	2,2

Произведена математическая обработка результатов (Рис. 4).

$$\delta x_i = 2 \cdot \frac{x_i - \frac{x_{i_{\max}} + x_{i_{\min}}}{2}}{x_{i_{\max}} - x_{i_{\min}}}, \quad (1)$$

где δx_i — нормированное значение i -го фактора;

x_i — значительность i -го фактора, в натуральных единицах;

$x_{i_{\max}}$ и $x_{i_{\min}}$ — максимальное и минимальное значения i -го фактора в соответствии с этим, в натуральных единицах.

Добавив стандартизованные коэффициенты в уравнение регрессии, оно будет иметь вид:

$$y_{j_{\text{выч}}} = a_0 + a_1 \cdot \delta x_1 + a_2 \cdot \delta x_2 + \dots + a_n \cdot \delta x_n, \quad (2)$$

где $\delta y_{j_{\text{выч}}}$ — нормированное значение j -го свойства ЦПМ;

a_0, a_1 — стандартизованные коэффициенты регрессии ..., a_n .

Применив критерий Фишера прошло проверку значимости и показало доверительную вероятность $\alpha = 0,95$.

В процессе обработки экспериментальных данных, было составлено уравнение регрессии (математическая модель), которое адекватно описывает зависимости напряжений, на поверхности плиты покрытия СС, от множества факторов. Такие, как X_1 , X_2 и X_3 , и визуализация этой зависимости была представлена на Рис. 5.

$$Y = -0,448 + 1,396 \cdot X_1 - 0,071 \cdot X_2 + 0,16 \cdot X_3 - 0,962 \cdot X_1^2 -$$

$$- 0,805 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,192 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,323 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$F_{\text{расч}} = 19,0811, F_{\text{табл}} = F(26, 23) = 1,9881$$

В ходе работы было установлено, что расчетное значения ($F_{\text{расч}}$) превышает табличное ($F_{\text{табл}}$), что указывает на статистическую точность уравнения регрессии. Из этого следует, что разработанная математическая модель показывает влияние факторов X_1 , X_2 и X_3 на способность модифицированной ЦПМ выполнять свою защитную функцию. Анализ показал, что при максимальном увеличении толщины стенки до 8,6 мм и шестикратном повышении ячейки покрытие СС испытывает минимальные динамические нагрузки. Оптимальный показатель, зафиксированный в ходе эксперимента, составил 2,25 МПа, что соответствует напряжениям в покрытии плиты СС, вызванных взрывом. Это значение является важным признаком, поскольку показывает, насколько эффективно покрытие выдерживает динамические действия и подтверждает правильность выбранных параметров для увеличения защиты СС. Из проведенных исследований можно сделать вывод, что ЗК СС ауксетического типа (ВВС) имеют явные преимущества перед традиционными решениями (плиты с воздушной прослойкой и плиты, в которых имелись пустоты правильной геометрической формы).

Выводы

Проведенное исследование подтверждает перспективность применения модифицированных цементно-песчаных матриц (ЦПМ) с ауксетической структурой для разработки усовершенствованных защитных систем. Полученные результаты создают основу не только для оптимизации существующих конструкций, но и для проектирования новых, более надежных решений, способных эффективно противостоять динамическим нагрузкам на СС.

Важным этапом работы стало построение регрессионной модели, устанавливающей количественную зависимость между напряжениями в плите покрытия СС и ключевыми факторами (X_1 , X_2 , X_3). Проведенный анализ показал, что оптимальное сочетание геометрических параметров конструкции — увеличение толщины стенок до 8,6 мм при шестикратном масштабировании ячеек — обеспечивает минимальный уровень динамических нагрузок. Экспериментально подтверждено, что данная конфигурация позволяет снизить напряжения до 2,25 МПа, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного решения для защиты сооружений от динамических воздействий и подтверждает корректность выбранных параметров модификации.

	Нормированные единицы								
	Sя/Sк	Sп/Sm	Прочность бетона					Y (напряжения)	
	Отн-е единицы	Отн-е единицы	B	4	5	6	7	МПа	
№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ²	X ₁ *X ₂	X ₁ *X ₃	X ₂ *X ₃	Y _{эксп.}	Y _{выч.}
1	-1,0	-1,0	-1,00	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,4	0,575
2	0,0	-1,0	-1,00	-0,3	-0,8	-0,6	-1,0	0,9	0,965
3	1,0	-1,0	-1,00	1,0	-0,5	-0,2	-1,0	0,8	0,881
4	-1,0	-0,4	-1,00	-1,0	-0,9	-1,0	-0,8	0,0	0,345
5	0,0	-0,4	-1,00	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	0,3	0,620
6	1,0	-0,4	-1,00	1,0	-0,1	-0,2	-0,8	-0,1	0,421
7	-1,0	1,0	-1,00	-1,0	-0,5	-1,0	-0,2	-0,3	-0,217
8	0,0	1,0	-1,00	-0,3	0,3	-0,6	-0,2	-0,6	-0,224
9	1,0	1,0	-1,00	1,0	1,0	-0,2	-0,2	-0,7	-0,705
10	-1,0	-1,0	0,00	-1,0	-1,0	-0,8	-0,8	0,4	0,631
11	0,0	-1,0	0,00	-0,3	-0,8	-0,2	-0,8	1,0	0,982
12	1,0	-1,0	0,00	1,0	-0,5	0,4	-0,8	0,9	0,860
13	-1,0	-0,4	0,00	-1,0	-0,9	-0,8	-0,5	0,0	0,364
14	0,0	-0,4	0,00	-0,3	-0,5	-0,2	-0,5	0,3	0,601
15	1,0	-0,4	0,00	1,0	-0,1	0,4	-0,5	-0,4	0,364
16	-1,0	1,0	0,00	-1,0	-0,5	-0,8	0,4	-0,4	-0,289
17	0,0	1,0	0,00	-0,3	0,3	-0,2	0,4	-0,7	-0,333
18	1,0	1,0	0,00	1,0	1,0	0,4	0,4	-0,9	-0,852
19	-1,0	-1,0	1,00	-1,0	-1,0	-0,6	-0,6	0,5	0,686
20	0,0	-1,0	1,00	-0,3	-0,8	0,2	-0,6	1,0	1,000
21	1,0	-1,0	1,00	1,0	-0,5	1,0	-0,6	0,9	0,840
22	-1,0	-0,4	1,00	-1,0	-0,9	-0,6	-0,1	0,0	0,383
23	0,0	-0,4	1,00	-0,3	-0,5	0,2	-0,1	0,3	0,581
24	1,0	-0,4	1,00	1,0	-0,1	1,0	-0,1	-0,5	0,306
25	-1,0	1,0	1,00	-1,0	-0,5	-0,6	1,0	-0,5	-0,361
26	0,0	1,0	1,00	-0,3	0,3	0,2	1,0	-0,8	-0,443
27	1,0	1,0	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,000
среднее	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
min	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
sko	0,83	0,86	0,83	0,84	0,60	0,62	0,62	0,65	0,60
max-min	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Рис. 4. Массив данных в нормированном виде

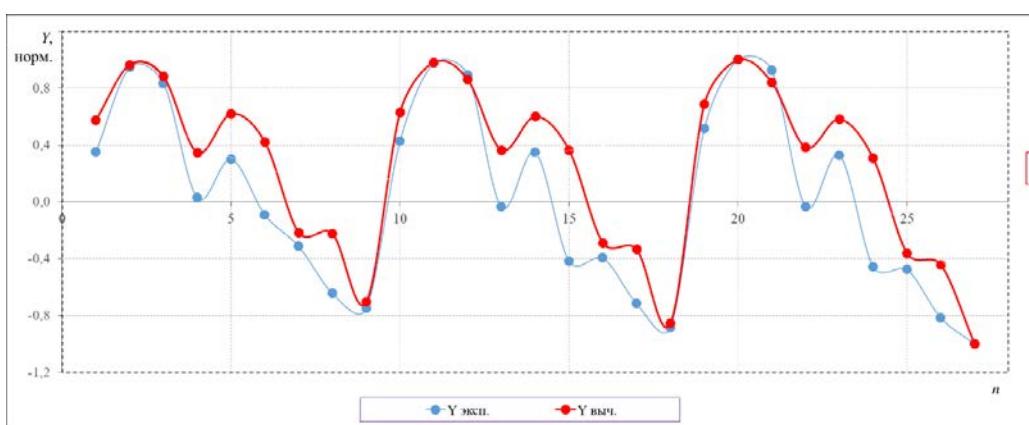


Рис. 5. Диаграмма экспериментальных и расчетных значений

Список литературы

1. Stolyarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engieneering Analysis with ANSYS Software. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2018. 526 p.
2. Schwerdtfeger J., Heinl P., Singer R. F. , KörnerAuxetic C. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting // Phys Status Solidi B. 2010. Vol. 247. I. 2. Pp. 269–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.200945513>
3. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review / X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie // Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27. No 2. Article number 023001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
4. Bell J., Zhang Y.X., Soe K., Hermes P. High Velocity Impact Behaviour of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composite Panels // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 450–451. Pp.563–567. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563>
5. Kelkar P. U. et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review / P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.-H. Cho, J.Y. Kwak, C.-Y. Kang, H.-C. Song // Sensors. 2020. Vo.I 20. Article number 3132. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113132>
6. Chen D., Zheng X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article number 9139. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26980-7>
7. Chen W.F. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill : J. Ross Publishing, 2007.
8. Albertini F. et al. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices / F. Albertini, J. Dirrenberger, A. Molotnikov, C. Sollogoub // Journal of Applied Mechanics. 2019. Vol 86. no 11. Article number 111003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044542>
9. Zhao X. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading / X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, Z.D. Ma // Materials & Design. 2018. Vol. 160. Pp. 527–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>

References

1. Stolyarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engieneering Analysis with ANSYS Software. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2018. 526 p.
2. Schwerdtfeger J., Heinl P., Singer R. F. , KörnerAuxetic C. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting // Phys Status Solidi B. 2010. Vol. 247. I. 2. Pp. 269–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.200945513>
3. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review / X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie // Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27. No 2. Article number 023001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
4. Bell J., Zhang Y.X., Soe K., Hermes P. High Velocity Impact Behaviour of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composite Panels // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 450–451. Pp.563–567. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563>
5. Kelkar P. U. et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review / P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.-H. Cho, J.Y. Kwak, C.-Y. Kang, H.-C. Song // Sensors. 2020. Vo.I 20. Article number 3132. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113132>
6. Chen D., Zheng X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article number 9139. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26980-7>
7. Chen W.F. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill : J. Ross Publishing, 2007.

8. Albertini F. et al. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices / F. Albertini, J. Dirrenberger, A. Molotnikov, C. Sollogoub // Journal of Applied Mechanics. 2019. Vol 86. no 11. Article number 111003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044542>
9. Zhao X. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading / X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, Z.D. Ma // Materials & Design. 2018. Vol. 160. Pp. 527–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>

Моделирование податливой структуры матрицы бетона

УДК 691.327-478

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0013>

Номер статьи: С0013

Каменев Юрий Александрович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3053-8640

kamenev.vka@mail.ru

Павлюк Александр Юрьевич

Главный испытательный космический центр имени Г.С. Титова

Московская область, Россия

sasha.pavlyuk.95@inbox.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

адъюнкт

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg258@gmail.ru

Карасев Сергей Юрьевич

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

vka@mail.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 27.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Цель исследования — разработка и верификация математической модели цементно-песчаной матрицы бетона с ауксетической возвратно-вогнутой структурой для повышения энергопоглощающих свойств строительных материалов, применяемых в специальных сооружениях Гражданской обороны Российской Федерации. Работа основана на анализе физико-механических характеристик композитных материалов, модифицированных пустотами различной геометрии, с учетом требований к защитным конструкциям, работающим при повышенных динамических нагрузках техногенного характера. Методы включают математическое моделирование методом конечных элементов для создания верифицированной модели цементно-песчаной матрицы бетона класса по прочности на сжатие В30 и В60. Верификация проводилась путем сравнения результатов моделирования с данными реальных испытаний на прессе, с заданием граничных условий, физико-механических свойств материалов и параметров нагружения. Для ауксетической структуры применялись возвратно-вогнутые ячейки с углом вогнутости 60° и длиной ребра 15 мм, моделируемые для кубов различных размеров (масштабирование и наложение ячеек). Результаты демонстрируют равномерное распределение напряжений в ауксетической структуре цементно-песчаной матрицы без эффекта «обоймы», характерного для стандартного бетона, с снижением прочности на сжатие (до 8,7 МПа для

B30 и 17,4 МПа для B60) при увеличении деформативности до 10 раз. Диаграммы напряжение-деформация подтверждают повышенную податливость, а соответственно и энергопоглощение. Практическая значимость заключается в применении модели для проектирования энергопоглощающих защитных конструкций специальных сооружений, повышающих их защищенность.

Ключевые слова: метаматериалы, ауксетические структуры, цементно-песчаная матрица, математическое моделирование, энергопоглощение, метод конечных элементов, бетонные конструкции, динамические нагрузки, защитные сооружения.

Modeling of the compliant structure of concrete matrix

Kamenev Yuriy Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences
A.F. Mozhaisky Military Space Academy,
lecturer
St. Petersburg, Russia
kamenev.vka@mail.ru

Pavlyuk Aleksandr Yurievich

Titov Main Test Space Center
Moscow Region, Russia
sasha.pavlyuk.95@inbox.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

A.F. Mozhaisky Military Space Academy,
adjunct
St. Petersburg, Russia
Nesterovoleg258@gmail.ru

Karasev Sergei Yurievich

Candidate of Technical Sciences
A.F. Mozhaisky Military Space Academy,
lecturer
St. Petersburg, Russia
vka@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to develop and verify a mathematical model of the cement-sand matrix (CSM) of concrete with an auxetic returnably-concave structure to enhance the energy-absorbing properties of construction materials used in special facilities (SF) of the Civil Defense of the Russian Federation. The work is based on the analysis of the physical and mechanical characteristics of composite materials modified with voids of various geometries, taking into account the requirements for protective structures operating under elevated dynamic loads of technogenic nature.

Methods include mathematical modeling using the finite element method to create a verified model of the cement-sand matrix of concrete with compressive strength classes B30 and B60. Verification was performed by comparing the modeling results with data from real tests on a press, specifying boundary conditions, physical and mechanical properties of materials, and loading parameters. For the auxetic structure, returnably-concave structure cells with a concavity angle of 60° and an edge length of 15 mm were used, modeled for cubes of various sizes (scaling and overlapping of cells).

The results demonstrate uniform stress distribution in the auxetic structure of the CSM without the "hoop" effect characteristic of standard concrete, with a reduction in compressive strength (down to 8.7 MPa for B30 and 17.4 MPa for B60) while increasing deformability up to

10 times. Stress-strain diagrams confirm increased compliance, and consequently, energy absorption.

The practical significance lies in the application of the model for designing energy-absorbing protective structures of SF, enhancing their protection.

Keywords: metamaterials, auxetic structures, cement-sand matrix, mathematical modeling, energy absorption, finite element method, concrete structures, dynamic loads, protective facilities.

Введение

Метаматериалы с искусственно созданными структурами открывают новые возможности для управления энергией в строительных материалах и конструкциях. Особый интерес представляют ауксетики – материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона, которые при сжатии уплотняются в поперечном направлении, повышая локальную плотность и поглощая энергию удара. Это свойство обеспечивает повышенную ударопрочность, устойчивость к разрушению и энергопоглощение, делая ауксетические структуры перспективными для применения в строительстве, включая специальные сооружения.

В контексте специальных сооружений, энергопоглощающие материалы необходимы для повышения податливости конструкций под динамическими нагрузками от техногенных катастроф и аварий на больших производствах. Традиционные бетоны по СП63.13330.2018 обладают ограниченными свойствами, поэтому модификация цементно-песчаной матрицы ауксетическими пустотами (ре-энтрант типа) позволяет оптимизировать поведение под нагрузкой [2].

Настоящая работа фокусируется на математическом моделировании для верификации и анализа таких структур.

Математическое моделирование

Разработка верифицированной математической модели ЦПМ бетона проводилась в программном комплексе ANSYS Static Structural, что позволило учесть нелинейные эффекты деформации и распределения напряжений в композитном материале. Алгоритм моделирования представлен на Рис. 1.

Модель цементно-песчаной матрицы создавалась для бетонов классов В30 и В60 в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 и СП63.13330.2018 (Табл. 1), где указаны модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности на сжатие и другие характеристики.

Таблица 1
Характеристики цементно-песчаной матрицы бетона

Материал	Плотность, кг/м ²	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Угол дилатансии, градусы
Бетон В30	2300	0,2	30	30	35
Бетон В60	2600	0,2	39,5	60	35

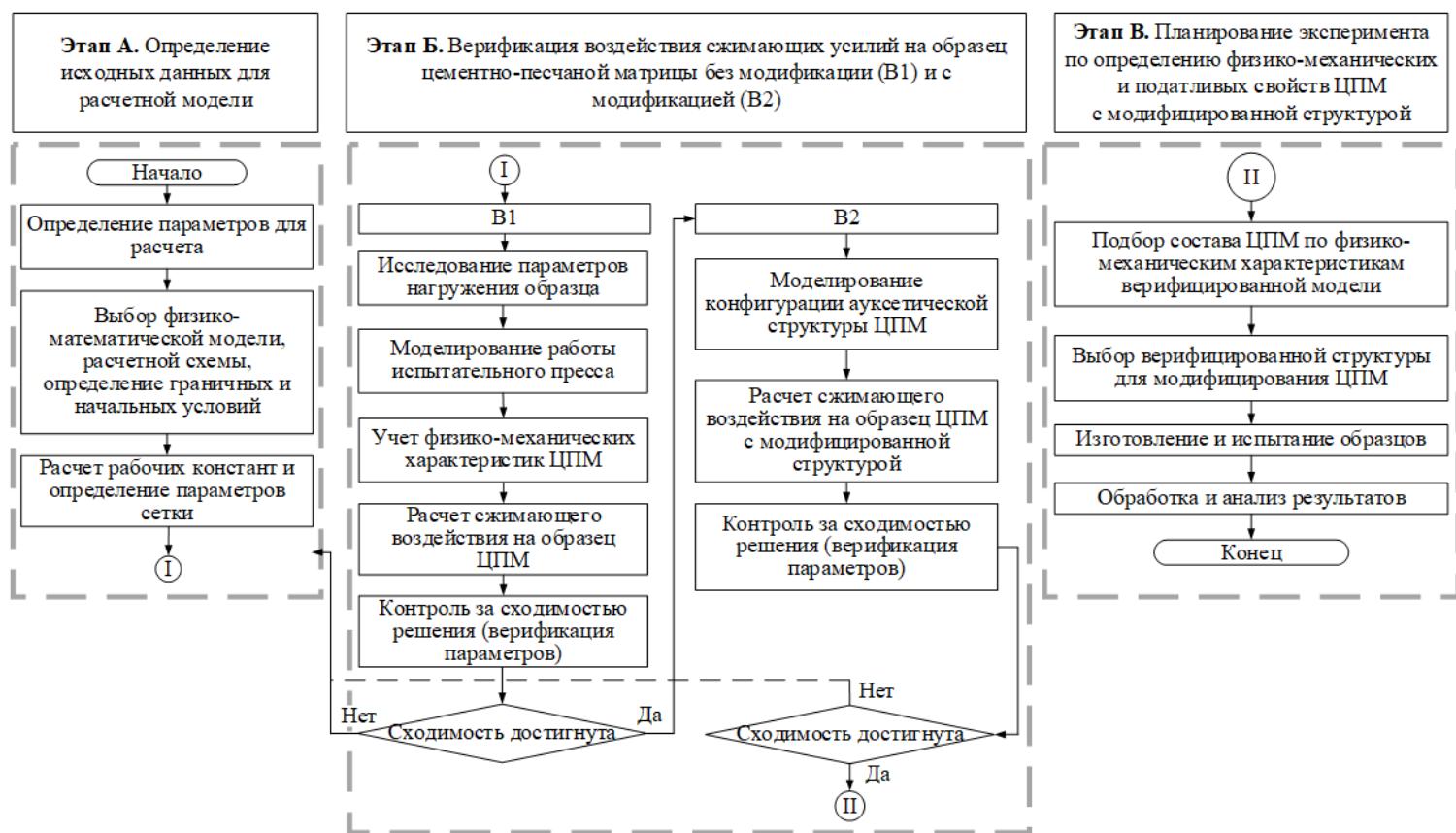


Рис. 1. Алгоритм планирования эксперимента по определению физико-механических характеристик модифицированных материалов

Для обеспечения точности модели применялась сетка, адаптированная к геометрии образцов (кубы 100×100×100 мм, 200×200×200 мм и 300×300×300 мм) для минимизации ошибок дискретизации и соответствует рекомендациям по моделированию ауксетических структур в ANSYS [1, 2]. Верификация модели осуществлялась путем сравнения результатов численного анализа с данными реальных испытаний на гидравлическом прессе в соответствии с ГОСТ 10180, после чего вносились корректировки в параметры материала для достижения сходимости.

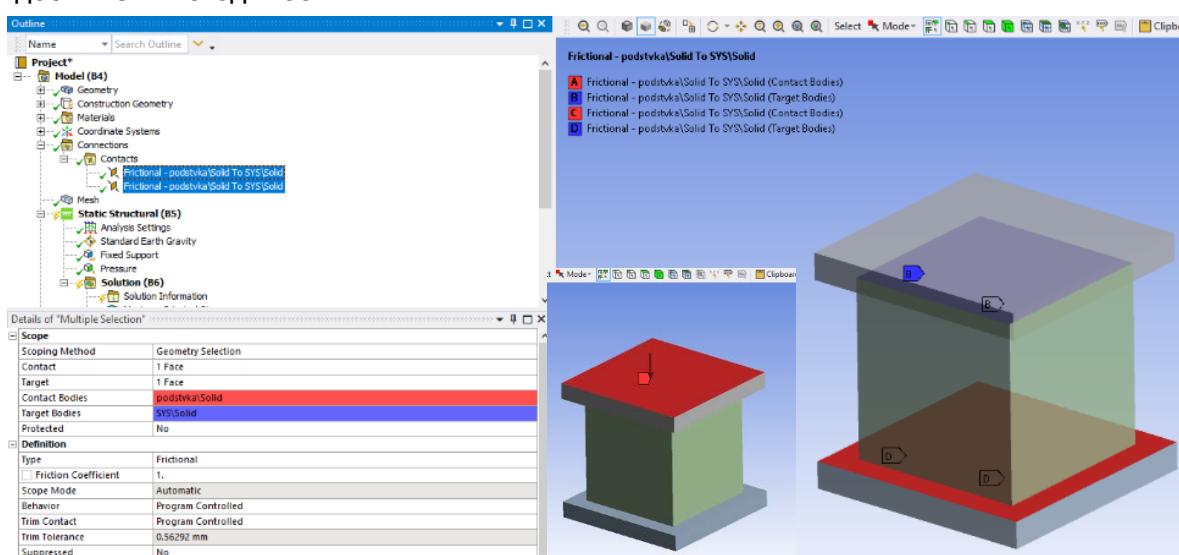


Рис. 2. Моделирование работы испытательного пресса

Границные условия и нагружение модели задавались в полном соответствии «реальному» эксперименту. Для моделирования испытания на прессе, были смоделированы две металлический пластины из конструкционной стали (Рис. 2).

Для качественной работы конструкции были заданы характеристики стальных пластин (Табл. 2).

Таблица 2
Физико-механические характеристики конструкционной стали пластин
моделируемого испытательного пресса

Плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести при растяжении, МПа
7850	0,3	20	460	250

После определения параметров для расчета задаются параметры нагружения образца (Табл. 3).

Таблица 3
Энергетическая характеристика катиона сырья (ОЭО)

Наименование	Заданная характеристика
Сила сжатия модели	30 МПа; 60 МПа
Устойчивость модели	функция «Fixed»
Расчетная сетка	размер ячеек сетки 10 мм
Количество подшагов нагрузки	100
Тип решателя	«Directive»
Трение	0,2

Моделирование конфигурации ауксетической структуры цементно-песчаной матрицы проводилось по следующим положениям (Рис. 3):

1. Первое положение основано на создании оптимальной геометрии ячейки для повышения энергопоглощения и программируемого разрушения. Это возможно в ауксетических структурах с отрицательным коэффициентом Пуассона, которые по геометрии максимально схожи с картиной разрушения бетонных образцов.

2. Второе положение заключается в том, что разрабатываемая ауксетическая структура должна сравниваться с сотовыми структурами правильной формы, типа круга или квадрата исходя из экономичности производства подобных конструкций к эффективности их применения в качестве энергопоглощающих.

3. Третье положение основано на принципе сохранения площади поперечного сечения сравниваемых типов пустот и количеству материала, участвующего в работе по сопротивлению сжимающим напряжениям.

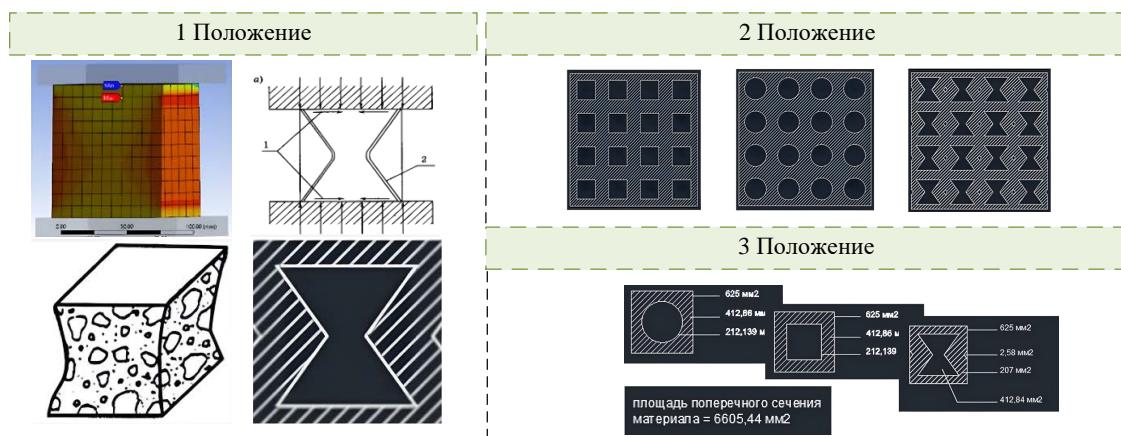


Рис. 3. Моделирование конфигурации ауксетической структуры ЦПМ

Моделирование проводилось с двумя подходами: масштабирование ячеек (увеличение размеров в 2–6 раз) и их наложение «друг на друга» (многослойная конфигурация), что позволяет оценить влияние геометрии на энергопоглощение [3].

Экспериментальные исследования проводились на гидравлическом прессе, в соответствии с ГОСТ 10180 и ГОСТ 26633. Образцы ЦПМ изготавливались из цемента М500, песка (фракция 0,63) и воды ($B/C=0,45$), с модификацией ауксетическими пустотами путем установки съемных цилиндров перед бетонированием.

Результаты

Математическое моделирование стандартной цементно-песчаной матрицы бетона класса В30 и В60 в ANSYS Static Structural показало, что разрушение образцов происходит при напряжениях $\sigma=28,5$ МПа для В30 и $\sigma=58,5$ МПа для В60, что соответствует требованиям

ГОСТ 10180 и СП63.13330.2018. Распределение внутренних напряжений в модели (Рис. 4а) демонстрирует типичный для традиционного бетона эффект «обоймы», где силы трения уменьшаются по мере удаления от торцевых граней, приводя к разрушению в форме четырех усеченных пирамид, сомкнутых малыми основаниями, как описано в ГОСТ 10180 (Рис. 4б).

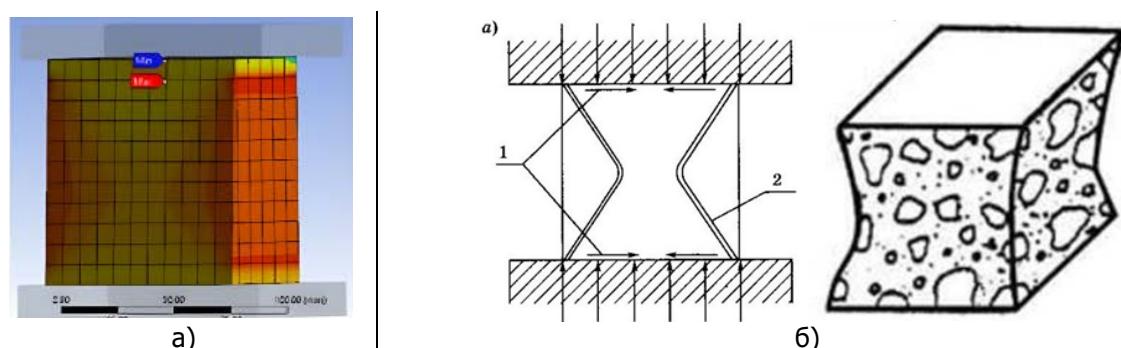


Рис. 4. Распределение внутренних напряжений при испытании на одноосное сжатие:

- Результат моделирования испытания образца ЦПМ;
- Характер разрушения ЦПМ по ГОСТ 10180-2012

Диаграмма напряжение-деформация (Рис. 5а) подтверждает приближение к реальным образцам (Рис. 5б), с верификацией модели по критериям прочности и характера разрушения.

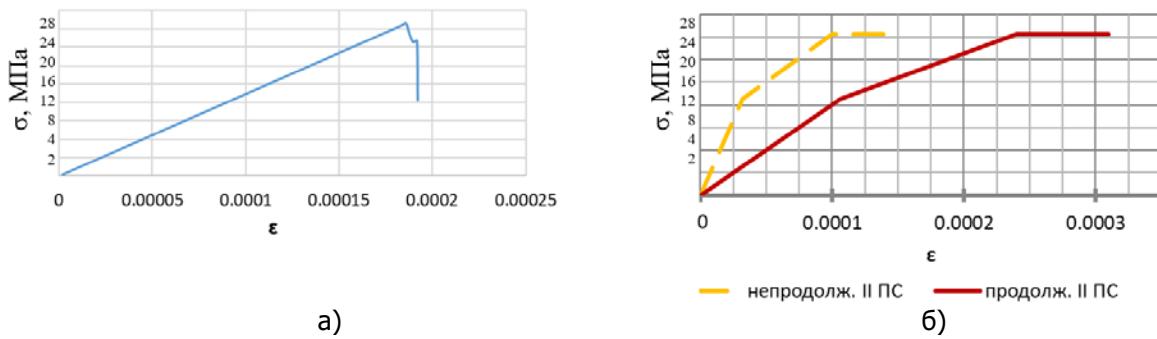


Рис. 5. Диаграммы разрушения образцов:
а) Математическая модель ЦПМ; б) Реальный образец ЦПМ по ГОСТ

Для ауксетической структуры на основе возвратно-вогнутых ячеек, моделируемой в кубах размерами $100 \times 100 \times 100$ мм, $200 \times 200 \times 200$ мм и $300 \times 300 \times 300$ мм (Рис. 6), анализ выявил отсутствие эффекта «обоймы» и более равномерное распределение нагрузки благодаря уникальной геометрии, перенаправляющей напряжения между элементами (Рис. 7а).

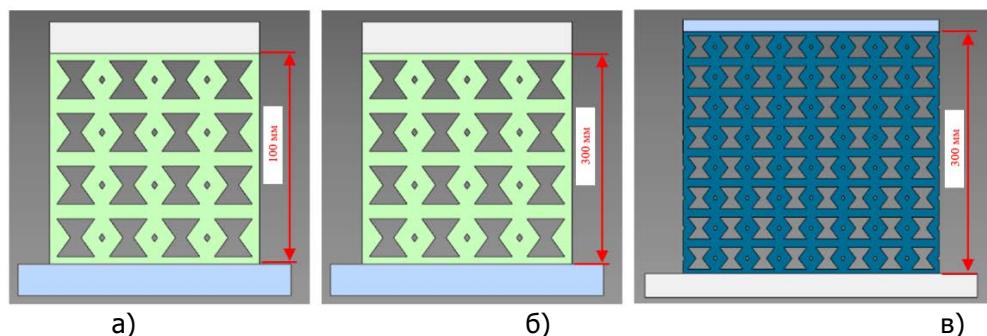


Рис. 6. Распределение внутренних напряжений при испытании на одноосное сжатие:
а) исходная структура; б) структура в масштабе; в) структура «друг на друге»

Это согласуется с исследованиями ауксетических метаматериалов в цементно-основанных композитах, где такая структура снижает концентрацию деформаций в центральной зоне [3, 5-8].

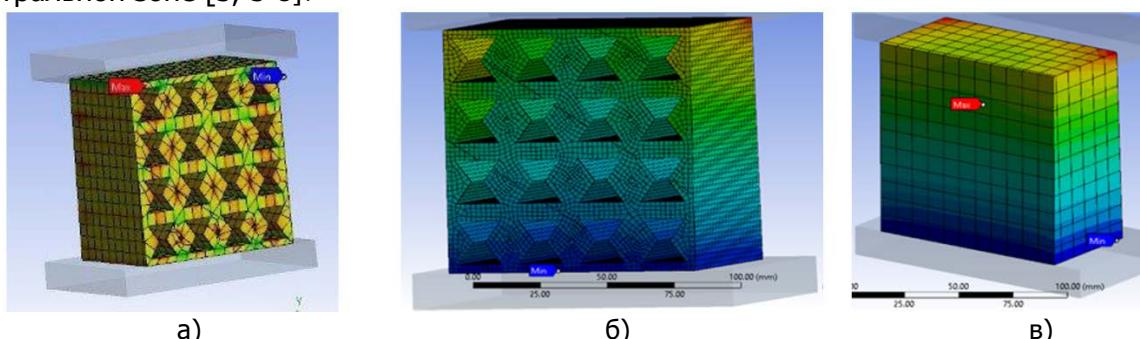


Рис. 7. Результат расчета модели ЦПМ с ауксетической структурой:
а) распределение напряжений в ауксетической структуре;
б) распределение деформаций ауксетической структуре;
в) распределение деформаций в верифицированном образце

Разрушение модифицированных образцов происходит при напряжениях 8,7 МПа для В30 и 17,4 МПа для В60, что указывает на снижение прочности на сжатие в 3,3 раза для В30 и 3,4 раза для В60 по сравнению со стандартными образцами. Однако деформативность увеличивается до 10 раз, как показано на диаграммах σ - ϵ (Рис. 8а для В30 и Рис. 8б для В60), где податливость материала возрастает, обеспечивая повышенное энергопоглощение в $\sim 5,6$ – $6,85$ раза.

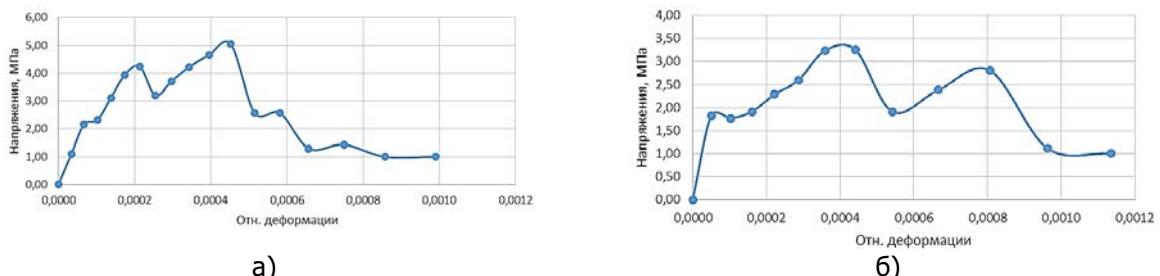


Рис. 8. Диаграмма σ - ε цементно-песчаной матрицы, модифицированной ауксетическими цилиндрами:
а) для бетона В30; б) для бетона В60

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение многопустотных плит покрытия специальных сооружений под динамическими нагрузками от воздействий аварийного техногенного характера.

Обсуждение

Проведенное исследование демонстрирует перспективу применения ауксетических метаматериалов в модификации цементно-песчаных матриц для повышения их энергопоглощающих свойств. Разработанная и верифицированная математическая модель стандартного бетона (В30 и В60) в ANSYS по результатам совпадает с экспериментальными данными по прочности, характеру разрушения и распределению напряжений. Это позволило перейти к моделированию возвратно-вогнутых ауксетических структур, которые, несмотря на снижение прочности (5,05 МПа для В30 и 3,25 МПа для В60), продемонстрировали принципиально иное поведение: равномерное распределение напряжений, отсутствие концентрации деформаций в центре и повышенную устойчивость к динамическим нагрузкам за счет уникальной геометрии ячеек.

Список литературы

1. Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio // Science. 1987. Vol. 235. P. 1038–1040.
 2. Ren X., Das R., Tran P., Ngo T.D., Xie Y.M. Auxetic metamaterials and structures: A review // Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27, no. 2. Article 023001.
 3. Структурное моделирование метаматериалов: монография / В.И. Ерофеев, И.С. Павлов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2019. 196 с.
 4. Zhong R., Ren X., Zhang X.Y., Luo C., Zhang Y., Xie Y.M. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 322. P. 126453.
 5. Luo C., Ren X., Han D., Zhang X.G., Zhong R., Zhang X.Y., Xie Y.M. A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: Design and compressive characteristic study // Engineering Structures. 2022. Vol. 268. P. 114759.
 6. Choudhry N.K., Panda B., Kumar S. In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing // Composites Part B: Engineering. 2022. Vol. 228. P. 109437.
 7. Zhang J., Lu G., You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review // Composites Part B: Engineering. 2020. Article 108340.
 8. Gao Y., Wei X., Han X., Zhou Z., Xiong J. Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism // International Journal of Solids and Structures. 2021. Vol. 233. Article 111232.

References

1. Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio // *Science*. 1987. Vol. 235. pp. 1038–1040.
2. Ren X., Das R., Tran P., Ngo T.D., Xie Y.M. Auxetic metamaterials and structures: A review // *Smart Materials and Structures*. 2018. Vol. 27, no. 2. Article 023001.
3. Structural modeling of metamaterials: monograph / V.I. Erofeev, I.S. Pavlov. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2019. 196 p.
4. Zhong R., Ren X., Zhang X.Y., Luo C., Zhang Y., Xie Y.M. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 322. P. 126453.
5. Luo C., Ren X., Han D., Zhang X.G., Zhong R., Zhang X.Y., Xie Y.M. A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: Design and compressive characteristic study // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 268. P. 114759.
6. Choudhry N.K., Panda B., Kumar S. In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 228. P. 109437.
7. Zhang J., Lu G., You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Article 108340.
8. Gao Y., Wei X., Han X., Zhou Z., Xiong J. Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism // *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vol. 233. Article 111232.

Оценка несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций вибрационным методом с определением положения нейтральной линии

УДК 69.059.22

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0014>

Номер статьи: C0014

Ковалев Фёдор Евгеньевич

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

старший преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9824-8594

kovaleff81@mail.ru

Зарин Сергей Владимирович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9353-5456

sergey зарин27091989@gmail.com

Селиверстов Николай Александрович

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

студент

Санкт-Петербург, Россия

seliverstovnikolay52@mail.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статья является развитие теоретических основ оценки несущей способности конструкций с использованием вибрационного метода, установление точного значения положения нейтральной линии в процессе эксплуатации железобетонных конструкций. В ходе исследования применялись методы математического моделирования, основанного на известных теоретических выражениях, и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. В работе рассматривались конструкции с разным уровнем несущей способности, а именно балка без дефектов, балка с небольшими трещинами и балка с магистральной трещиной. Полученные экспериментальные значения остаточной высоты сечения бетона и высоты скатой зоны достаточно точно совпадают с данными математического моделирования для этих характеристик. Полученные результаты позволяют приблизиться к решению задачи теоретического обоснования вибрационного метода обследования железобетонной конструкции, усовершенствования методов его проведения и повышения точности получаемых результатов.

Ключевые слова: несущая способность, вибрационный метод, железобетонные конструкции, дефекты.

Estimation of the load-bearing capacity of existing reinforced concrete structures by vibration method with determination of the neutral line position

Kovalev Fyodor Evgenievich

Candidate of Technical Sciences,
Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Senior Lecturer
Saint Petersburg, Russia
kovaleff81@mail.ru

Sarin Sergey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences,
Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Lecturer,
Saint Petersburg, Russia
sergey_zarin27091989@gmail.com

Seliverstov Nikolai Alexandrovich

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Student
St. Petersburg, Russia
seliverstovnikolay52@mail.ru

Abstract. The objective of this article is to develop the theoretical foundations for assessing the load-bearing capacity of structures using the vibration method, to establish the exact value of the position of the neutral line during the operation of reinforced concrete structures. The following methods were used in the study: mathematical modeling based on known theoretical expressions and comparison of the obtained results with experimental data. The paper considered structures with different levels of load-bearing capacity, namely a beam without defects, a beam with small cracks, and a beam with a main crack. The obtained experimental values of the residual height of the concrete cross-section and the height of the compressed zone quite accurately coincide with the data of mathematical modeling for these characteristics. The results obtained will allow us to approach the solution of the problem of theoretical justification of the vibration method of inspection of reinforced concrete structures, improve the methods of its implementation and improve the accuracy of the results obtained.

Keywords: load-bearing capacity, vibration method, reinforced concrete structures, defects.

Широкое применение железобетонных конструкций (ЖБК) в качестве несущего остова зданий началось примерно с 60-х годов прошлого века и насчитывает более 70 лет. За столь длительный период эксплуатации в конструкциях появились дефекты различного типа. В настоящее время, одним из актуальных вопросов является вопрос оценки их технического состояния в соответствии с ГОСТ 31937-2024. Использование современных приборов неразрушающих методов контроля позволяет определять лишь физико-механические характеристики ЖБК, и потом с помощью расчётных формул оценивать их несущую способность. Одним из способов оценивания несущей способности конструкций, без применения расчётных методов, является вибрационный метод [1-3].

Для теоретического обоснования вибрационного метода неразрушающего контроля железобетонных конструкций [1, 4], путем измерения частот колебаний и геометрических параметров конструкции необходимо точно понимать в какой степени в работе данной ЖБК

задействованы ее элементы. Какая доля нагрузки приходится на бетон, а какая на арматуру?

Ключевым параметром для определения этих соотношений является положение нейтральной линии сечения, или высота сжатой зоны бетона x [3,5]. Расчеты этого параметра, согласно нормативной документации, позволяют рассчитать значение нейтральной линии для состояния близкого к разрушению конструкции, что не приемлемо для целей диагностики.

Согласно СП 63.13330.2018 пространственная жесткость железобетонной балки определяется по формуле:

$$D = k_b \cdot E_b \cdot I + k_s \cdot E_s \cdot I_s, \quad (1)$$

где E_b — модуль упругости бетона;

E_s — модуль упругости арматуры;

I — момент инерции полного сечения;

I_s — момент инерции всей продольной арматуры в сечении;

k_b — безразмерный коэффициент для бетона, вычисляемый по формуле:

$$k_b = \frac{0,15}{\phi_1 \cdot (0,3 + \delta_e)},$$

где ϕ_1 — коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки;

δ_e — относительное значение эксцентриситета;

$k_s = 0,7$ — коэффициент для арматуры.

Запишем уравнение жесткости сечения железобетонной балки относительно уровня нейтрального слоя, так как поворот сечения осуществляется именно относительно этой линии.

$$I(x) = \frac{b}{3} \cdot (x^3 + [(h_0 - \delta) - x]^3), \quad (2)$$

$$I_s(x) = I_{sc} + I_s + A'_s(x - a')^2 + A_s(h_0 - x)^2, \quad (3)$$

где x — высота сжатой зоны;

δ — глубина трещины;

b — ширина сечения;

h_0 — рабочая высота бетона;

I_{sc}, I_s — моменты инерции относительно своих центров тяжести сжатой и растянутой арматуры соответственно;

A'_s, A_s — расчетные площади сжатой и растянутой арматуры соответственно.

Значения I_{sc}, I_s приобретают малы в сравнении с остальными слагаемыми, поэтому приравняем их к нулю и в дальнейших расчетах рассматривать не будем.

Подставив выражения (2), (3) в исходное выражение (1) получаем формулу для оценки жесткости железобетонной балки в зависимости от положения нейтрального слоя или высоты сжатой зоны бетона:

$$D = k_b E_b \frac{b}{3} \cdot (x^3 + [(h_0 - \delta) - x]^3) + k_s E_s (A'_s(x - a')^2 + A_s(h_0 - x)^2), \quad (4)$$

Для удобства записи введем коэффициенты a_1, a_2, a_3 :

$$a_1 = k_b E_b b (h_0 - \delta) + k_s E_s (A'_s + A_s), \quad (5)$$

$$a_2 = k_b E_b b (h_0 - \delta)^2 + k_s E_s (A'_s a' + A_s h'_0), \quad (6)$$

$$a_3 = \frac{k_b E_b b (h_0 - \delta)^3}{3} + k_s E_s (A'_s a'^2 + A_s h'_0^2). \quad (7)$$

Конечное уравнение запишем в виде:

$$D = a_1 x^2 - a_2 x + a_3. \quad (8)$$

Для примера возьмём железобетонную балку 1ПБ-10-1П, характеристики которой представлены в Таблице 1. Схема загружения и сечение балки представлено на Рис. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1
Оценка эффективности компонентов добавки

Марка	Размеры, мм										Масса, кг	$E_s, \text{МПа}$	$E_b, \text{МПа}$
	L	L_0	b	b'	h	h_0	a	a'	d	δ			
1ПБ-10-1П	1030	930	120	80	65	53	12	18	4	Var(0 ... h0)	20	3×10^4	2×10^5

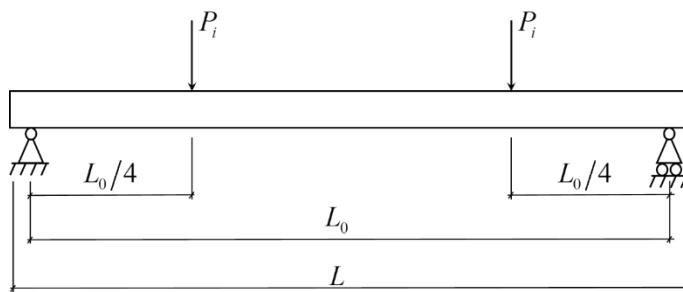


Рис. 1. Расчетная схема балки 1 ПБ-10-1П

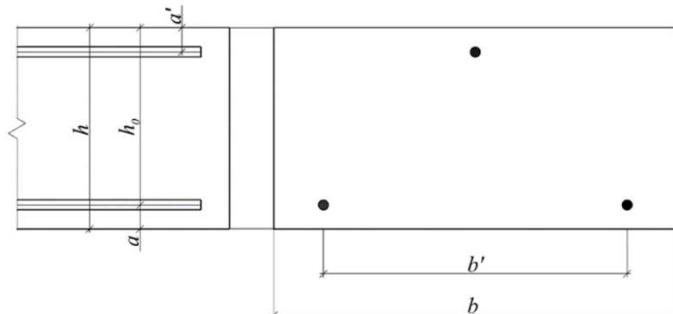


Рис. 2. Сечение балки 1 ПБ-10-1П

Применим уравнение (8) к исходной балке и определим те состояния, в которых жесткость достигает своих минимальных/максимальных значений и не может выходить за отведенные границы.

Уравнение (8) является квадратным, график которого представляет собой параболу, ветви которой направлены вверх, а вершина имеет координаты (m, n), где

$$m = -\frac{-a_2}{2 \cdot a_1}, \quad (9)$$

$$n = -\frac{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}{4 \cdot a_1}, \quad (10)$$

Необходимо найти экстремумы функции $D(x, \delta)$. Принимая во внимание, что высота сжатой зоны x не может быть больше остаточной высоты бетонного сечения построим графики $X_{min}(\delta) = m(\delta)$, $X_{max}(\delta) = h_0 - \delta$ (Рис. 3). Превалирующим условием является условие максимума, второстепенным – условие минимума. Таким образом, высота сжатой зоны должна находиться в выделенной области графика в любом состоянии балки.

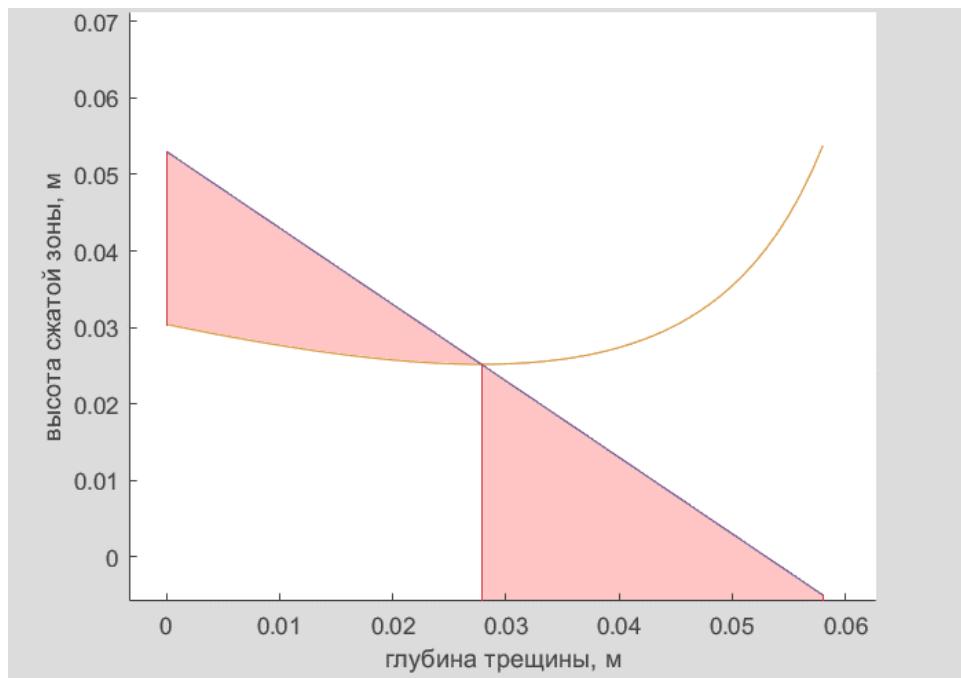


Рис 3. Область допустимых значений высоты сжатой зоны бетона

Назовем трещины, глубина которых попадает в 1 и 2 области трещинами первого и второго типа соответственно, и исследуем распределение напряжений в сечении и высоту сжатой зоны бетона. Для этого смоделируем в программном комплексе «ELCUT» данные случаи (Рис. 4–6), рассматривая железобетонную балку как упруго-деформируемую систему.

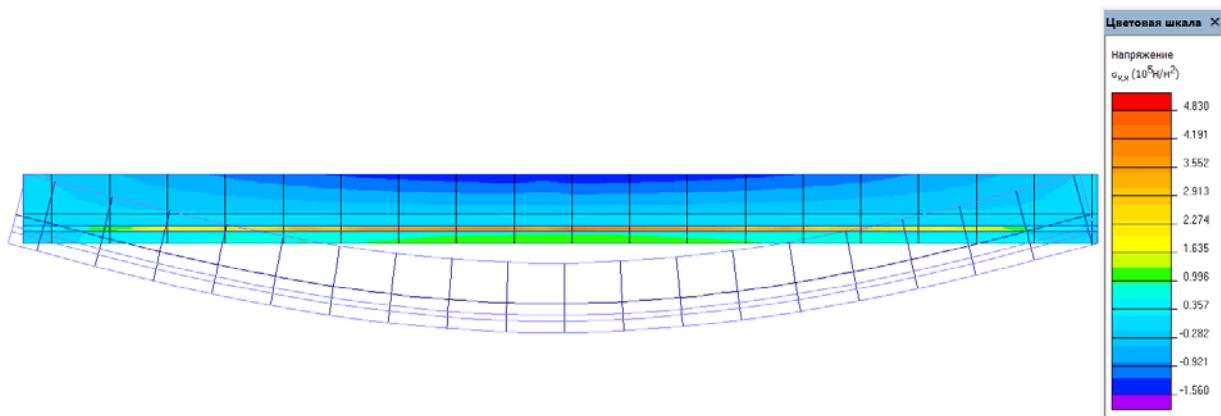


Рис. 4. Модель балки без трещин

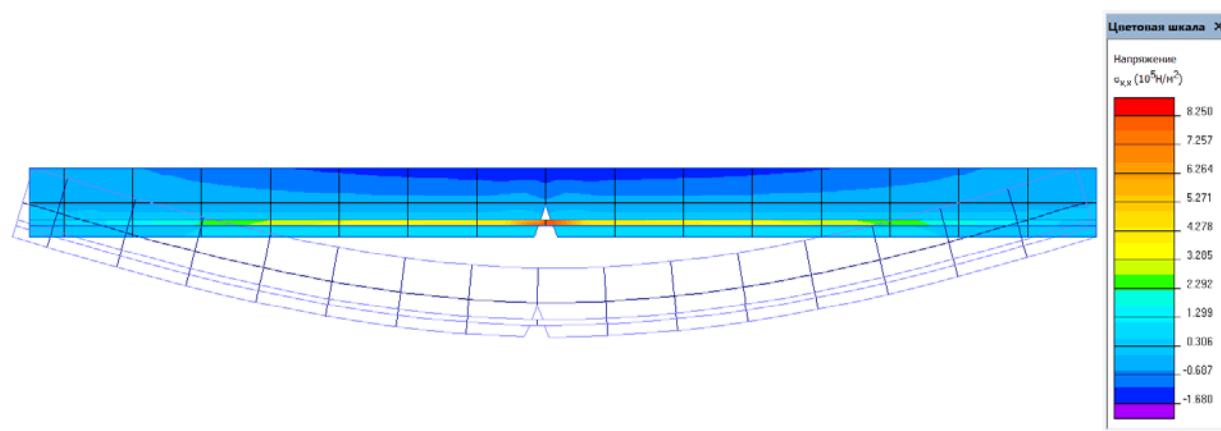


Рис. 5. Модель балки с трещиной первого типа

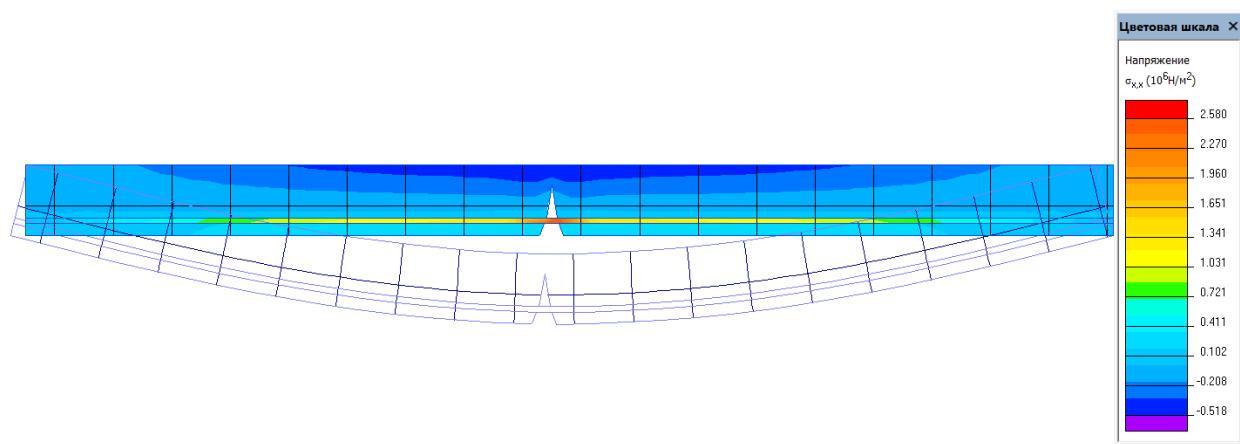


Рис. 6. Модель балки с трещиной второго типа

Полученные результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2
Результаты исследования

Тип трещины	Результаты моделирования			Результаты теоретического расчета	
	Глубина трещины δ , мм	Остаточная высота сечения бетона, мм	Высота сжатой зоны x , мм	Максимальное значение высоты сжатой зоны x_{\max} , мм	Минимальное значение высоты сжатой зоны x_{\min} , мм
Без трещины	-	60,00	29,65	53,00	30,00
Первый тип	23,00	37,00	27,33	35,00	27,00
Второй тип	43,00	17,00	15,31	17,00	0,00

Вывод: таким образом, с использованием математических зависимостей, были определены границы нахождения фактического значения высоты сжатой зоны бетона x , которые подтверждаются моделированием с использованием метода конечных элементов.

Полученные результаты позволяют приблизиться к решению задачи теоретического обоснования вибрационного метода обследования железобетонной конструкции, усовершенствования методов его проведения и повышения точности получаемых результатов.

Список литературы

1. Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Мохнаткин А.П., Старчуков Д.С. Становление и развитие вибрационных систем мониторинга технического состояния несущих элементов стартовых сооружений. 2015. 110 с.

2. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Об эффективности метода вибрационной диагностики элементов строительной части стартовых сооружений // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 431–441.
3. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Учет трещинообразований бетона в вибрационной диагностике пролетных железобетонных конструкций // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Вып. 2018. Вып. 663. С. 99–104.
4. Исхаков Ш. Ш., Ковалев Ф. Е., Косенков Р. Э., Мохнаткин А. П. Проблемы оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний // Известия ПГУПС. 2016. Т. 13, вып. 4(49). С. 592–599.
5. Ковалев Ф. Е., Мохнаткин А. П. Методика оценивания допредельных и предельных состояний пролетных железобетонных конструкций стартовых сооружений по параметру высоты сжатой зоны бетона. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № 681. 170-175 с.

References

1. Iskhakov Sh.Sh., Kovalev F.E., Mokhnatkin A.P., Starchukov D.S. Formation and development of vibration monitoring systems for the technical condition of load-bearing elements of launch facilities. 2015. 110 p.
2. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F. E., Sarin S. V. On the effectiveness of the method of vibration diagnostics of elements of the construction part of launch facilities // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2018. I. 10. Pp. 431-441.
3. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F. E., Sarin S. V. Accounting for concrete cracking in vibration diagnostics of span reinforced concrete structures // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2018. I. 663. Pp. 99-104.
4. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F.E., Kosenkov R.E., Mokhnatkin A.P. Problems of assessing the reliability and safety of operated structures of ground-based space infrastructure and identification of their technical conditions // Izvestiya PGUPS. 2016. Vol. 13, I. 4(49). Pp. 592-599.
5. Kovalev F.E., Mokhnatkin A.P. Methodology for estimating the pre-limit and limit states of span reinforced concrete structures of launch facilities according to the height parameter of the compressed concrete zone. // Proceedings of the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky. 2022. No. 681. Pp. 170-175.

Исследование влияния асфальтобетонного подбалластного слоя на накопление остаточных деформаций в конструкции железнодорожного пути

УДК 625.041.2

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0015>

Номер статьи: C0015

Колос Алексей Федорович

д-р техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, зав. кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9591-6498

kolos2004@inbox.ru

Черняева Виктория Андреевна

к-т техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, доцент кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 6202-2098

chernyaeva@pqups.ru

Шехтман Евгений Иосифович

д-р воен. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, профессор кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 7185-9172

director@sptgt.ru

Соколов Леонид Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, аспирант кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

leonid.sokolov.99@mail.ru

Статья получена: 30.10.2025. Одобрена: 26.11.2023. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Исследованию эффективности асфальтобетонного материала в конструкции железнодорожного пути посвящена серия публикаций. В данной статье рассмотрено влияние подбалластного слоя из асфальтобетона на накопление остаточных деформаций земляного полотна железнодорожного пути. Целью работы являлось определение деформаций земляного полотна на опытном участке Московской железной дороги, включающим в себя экспериментальный участок протяженностью 500 м, с уложенным асфальтобетонным слоем, и контрольный участок протяженностью 500 м, без устройства асфальтобетонного слоя. Проведен анализ первичных данных, полученных по результатам нивелировки грунтовых марок на опытном участке, определены абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя и на контрольном участке; проведена оценка

темперы накопления и неравномерность остаточных деформаций земляного полотна на каждом из участков за рассматриваемый период.

Ключевые слова: железная дорога, подбалластный слой, асфальтобетонный слой, земляное полотно, остаточные деформации, осадка земляного полотна, грунтовые марки.

Study of the effect of asphalt concrete subballast layer on the accumulation of residual deformations in the railway track structure

Kolos Alexey Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of Department "Construction of roads of the transport complex"
St. Petersburg, Russia
kolos2004@inbox.ru

Chernyaeva Victoria Andreyevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Associate Professor of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
chernyaeva@pgups.ru

Shekhtman Evgeny Iosifovich

Doctor of Warrior Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Professor of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
director@sptgt.ru

Sokolov Leonid Konstantinovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
graduate student of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
leonid.sokolov.99@mail.ru

Abstract. A series of publications is devoted to the study of the effectiveness of asphalt concrete material in the design of the railway track. This article discusses the effect of the sub-ballast layer of asphalt concrete on the accumulation of residual deformations of the roadbed of the railway track. The purpose of the work was to determine the deformations of the roadbed on the experimental section of the Moscow Railway, which includes an experimental section with a length of 500 m, with a laid asphalt concrete layer, and a control section with a length of 500 m, without the construction of an asphalt concrete layer. An analysis of the primary data obtained from the results of leveling soil grades at the experimental site was carried out, the absolute values of the residual deformations of the subgrade at the site of the sub-ballast asphalt concrete layer and at the control site were determined; the rate of accumulation and the unevenness of residual deformations of the subgrade in each of the sections for the period under review were assessed.

Keywords: railway, sub-ballast layer, asphalt concrete layer, subgrade, residual deformations, subgrade settlement, soil grades.

Введение

В зарубежных странах в течение последних нескольких десятилетий протяженность участков пути с конструкцией защитного слоя из асфальтобетона постоянно увеличивается. Эта технология применена при строительстве множества новых высокоскоростных пассажирских линий в Европе и Азии [1-4].

Теоретические аспекты эффективности применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути, основанные на зарубежном опыте, подробно рассмотрены в работе авторов «Эффективность применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути» [5].

В Российской Федерации в 2022 году начались исследования эффективности применения асфальтобетона в конструкции железнодорожного пути. Первый участок протяженностью 500 м был сооружен в 2024 году на Московской железной дороге. ФГБОУ ВО ПГУПС совместно с Ассоциацией «Р.О.С.Асфальт» осуществляет мониторинг за состоянием опытного участка железнодорожного пути. Исследованию эффективности асфальтобетонного материала в конструкции железнодорожного пути посвящена серия публикаций. В данной статье рассмотрено влияние подбалластного слоя из асфальтобетона на накопление остаточных деформаций земляного полотна железнодорожного пути.

Характеристика опытного участка

Объектом выполнения работ в рамках мониторинга является опытный участок, протяженностью 1000 м, включающий в себя участок железнодорожного пути с подбалластным слоем из асфальтобетона (экспериментальный участок) протяженностью 500 м и участок железнодорожного пути без подбалластного слоя из асфальтобетона (контрольный участок) протяженностью 500 м. Оба участка являются смежными (Рис. 1), располагаются в Рязанской области, Рыбновском районе и обладают одинаковыми эксплуатационными характеристиками:

- грузонапряженность участков 26,29 млн. тонн брутто / км;
- пропущенный тоннаж за период проведения исследований составил 18,31 млн. тонн брутто;
- земляное полотно представлено насыпью вне косогора максимальной высотой до 2 м.

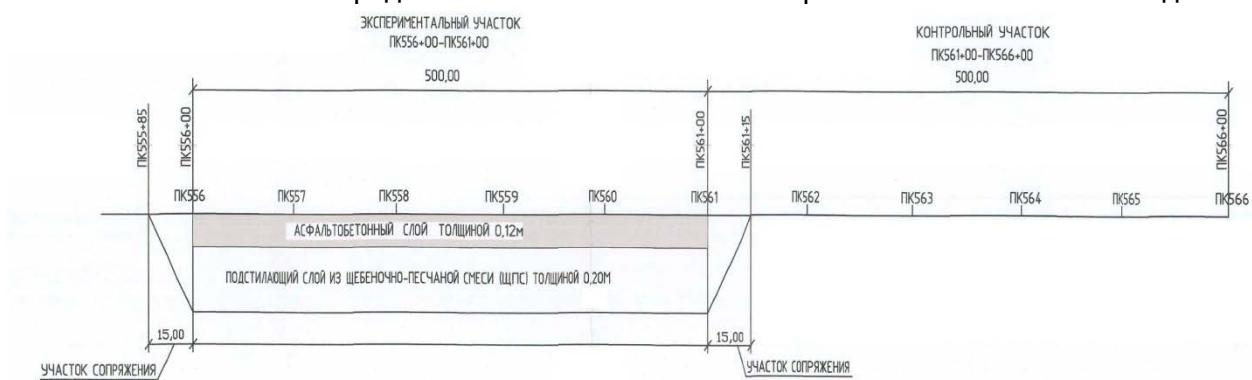


Рис. 1. Схема устройства подбалластного слоя на экспериментальном и контрольном участках

Конструкция железнодорожного пути в пределах экспериментального и контрольного участков приведена на Рис. 2, 3.

На основании выполненного комплекса лабораторных испытаний для проведения полевого эксперимента в качестве основного материала выбрана асфальтобетонная смесь А32Нт по ГОСТ Р 58406.2, уложенная в один слой толщиной 12 см с последующим уплотнением.

Поперечное сечение экспериментального участка (протяженность 500 м)

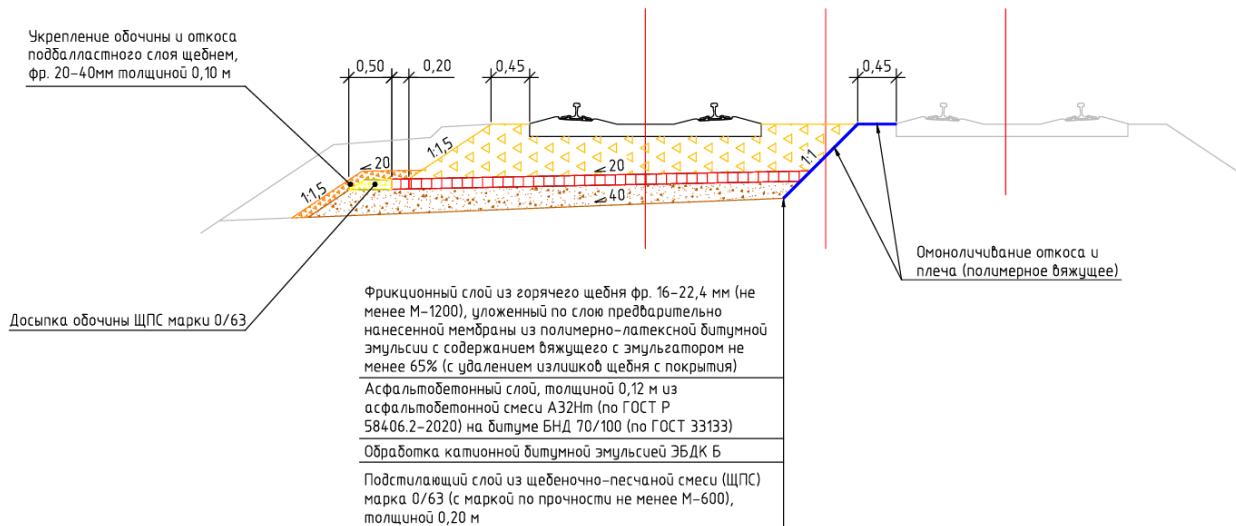


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментального участка с асфальтобетонным подбалластным слоем

Поперечное сечение контрольного участка (протяженность 500 м)

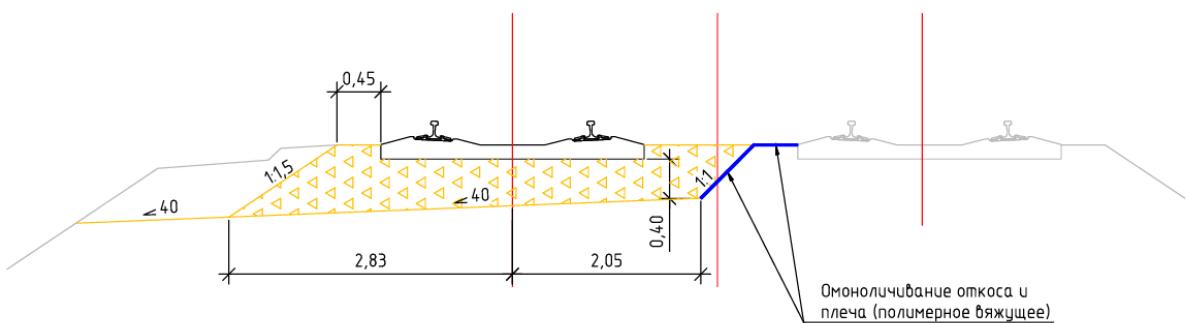


Рис. 3. Поперечное сечение контрольного участка

Инженерно-геологические условия

Основанием для подбалластного слоя асфальтобетона являются легкие, полутвердые глины с прослойками глины твердой, обладающие тиксотропными свойствами, суглинки тугопластичной консистенции с прослойками водонасыщенного песка с природной влажностью 20 %.

На период изысканий (август 2024 г), до глубины бурения 10,0 м, было установлено наличие вод спорадического распространения.

С целью оценки степени пучинистости глинистых грунтов, попадающих в зону сезонного промерзания, проведены расчеты соответствующего параметра. Согласно полученным результатам выявлены грунты, которые относятся к сильнопучинистым (суглинок мягкопластичный) и являются основанием подбалластного слоя из асфальтобетона на экспериментальном участке и балластного слоя на контрольном участке.

Согласно СП 22.13330.2016 по сложности инженерно-геологических условий участок исследования относится к II (средней) категории.

Методика проведения исследования

Для определения деформаций земляного полотна на опытном участке Московской железной дороги была создана высотная опорная геодезическая основа, состоящая из трех грунтовых реперов, заложенных в центре экспериментального участка в пределах полосы

отвода железной дороги, определение высот производилось методом геометрического нивелирования в условной системе высот. Данный метод успешно применяется специалистами ПГУПС при решении различных задач по оценке деформируемости конструкции железнодорожного пути [6].

Грунтовым реперам была присвоена нумерация: Rp1, Rp2, Rp3.

Нивелирование выполнялось по замкнутому ходу цифровыми нивелирами с использованием инварных реек по программе III класса точности.

С целью контроля устойчивости грунтовых реперов перед каждым циклом контроля осадок производится проложение контрольного хода по этим реперам. По результатам анализа выбирается стабильный репер для данного цикла измерений абсолютных осадок.

Система высот опорных реперов – условная, при этом в качестве исходного принят репер Rp1 с высотой 10,000 м.

Опытный участок оборудован деформационными марками, установленными на подбалластный асфальтобетонный слой или основную площадку земляного полотна. Общий вид деформационной марки приведен на Рис. 4. Глубина установки марок составила 45 см под подошвой шпалы. Для установки деформационных марок были вырыты шурфы.



Рис. 4. Общий вид деформационной марки, устанавливаемой на основную площадку земляного полотна

Марки установлены как в продольном, так и в поперечном оси пути направлении. Общая схема установки деформационных марок на основную площадку земляного полотна представлена на Рис. 5, 6.

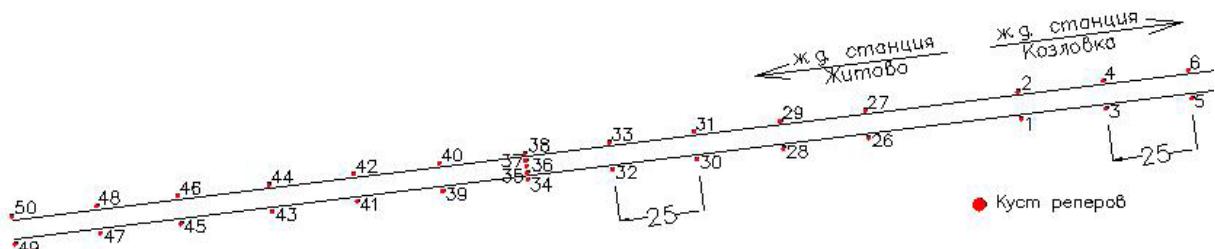


Рис. 5. Схема установки грунтовых марок на контрольном участке (левая сторона)

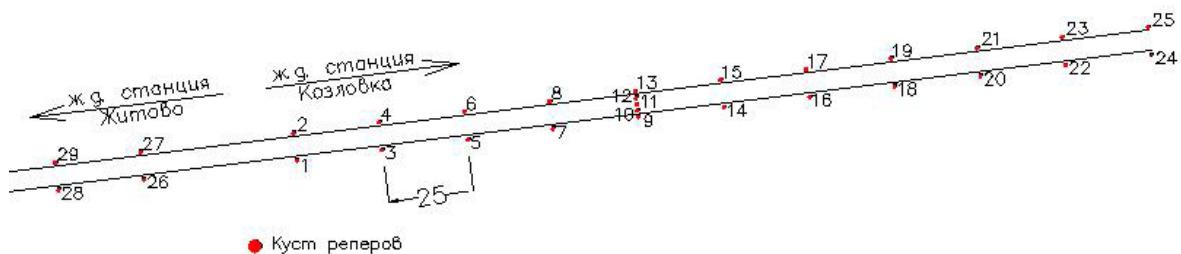


Рис. 6. Схема установки грунтовых марок на экспериментальном участке (правая сторона)

Целью нивелирования грунтовых марок является измерение остаточных деформации в уровне верха подбалластного асфальтобетонного слоя / основной площадки земляного полотна (контрольный участок).

Данная схема установки марок позволяет решить следующие задачи:

- определить абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя и на контрольном участке;
- оценить темп накопления остаточных деформаций на каждом из участков за рассматриваемый период;
- оценить неравномерность остаточных деформаций земляного полотна в продольном и поперечном осях пути направления;
- оценить влияние слоя асфальтобетона на изменение темпа накопления остаточных деформаций земляного полотна.

Результаты измерений

В период с января по май 2025 года проведено 9 циклов геодезического контроля деформаций основной площадки земляного полотна, первый из которых является нулевым (Таблица 1).

Остаточную деформацию основной площадки земляного полотна в месте установки грунтовой марки в момент времени t определяют по формуле:

$$\Delta S_t = A_B - A_t$$

где ΔS_t — остаточная деформация основной площадки земляного полотна, мм; A_B — базовая абсолютная высотная отметка верха грунтовой марки, м; A_t — абсолютная высотная отметка верха грунтовой марки в момент времени t .

Полученные данные являются основанием для определения темпа накопления остаточных деформаций земляного полотна. Для этих целей в каждой точке створа строят зависимость развития остаточной деформации от пропущенного тоннажа.

На основе результатов исследований сопоставлены остаточные деформации земляного полотна и темпы их накопления (Рис. 7–10).

В качестве показателя, отражающего равномерность остаточной деформации, принимают следующие показатели: среднеквадратическое отклонение остаточной деформации основной площадки земляного полотна от средней величины в пределах рассматриваемого экспериментального участка, коэффициент вариации. Данные параметры вычисляются на основе статистической обработки результатов измерений по известным в математической статистике формулам (Таблица 2).

Таблица 1

График геодезической съемки грунтовых марок

Цикл	Дата	Пропущенный тоннаж, млн. тонн брутто
Цикл 0	16.01.2025	9,695
Цикл 1	31.01.2025	10,79
Цикл 2	20.02.2025	12,25
Цикл 3	27.02.2025	12,98
Цикл 4	11.03.2025	13,783
Цикл 5	25.03.2025	14,805
Цикл 6	15.04.2025	16,265
Цикл 7	22.04.2025	16,776
Цикл 8	13.05.2025	18,309



Рис. 7. Накопление остаточной деформации на контрольном участке



Рис. 8. Накопление остаточной деформации на экспериментальном участке



Рис. 9. Интенсивность накопление остаточной деформации на контрольном участке



Рис. 10. Интенсивность накопление остаточной деформации на экспериментальном участке

Анализ результатов по оценки остаточных деформаций грунтовых марок также показывает формирование явления морозного пучения грунтов:

- на контрольном участке в период с января по март наблюдается пучение грунта (накопленная деформация достигает значений +5,2 мм); после 25 марта 2025 года наблюдаются попеременные процессы: осадки (до -4,11 мм и всучивания грунта до 0,9 мм);
 - на экспериментальном участке в период с января по февраль наблюдается незначительное пучение грунта (накопленная деформация достигает значений +0,9 мм); после 27 февраля 2025 года процессы пучения не зафиксированы.
- В поперечном направлении:
- на контрольном участке зафиксировано поднятие отметки грунта до +4,3 мм;
 - на экспериментальном участке процессы пучения не зафиксированы.

На Рис. 11 приведены значения остаточных деформаций деформационных марок между четвертым и пятым циклами измерений, что соответствует периоду 11.03.2025 – 25.03.2025. В процессе анализа результатов накопления остаточной деформации учитывались погодные условия на участке в период испытаний. График изменения температуры воздуха, количества осадков на период наблюдений приведены на Рис. 12. Согласно полученным данным в период между четвертым и пятым циклами измерений происходит сезонные процессы оттаивания – промерзания грунтов. Проведенный анализ показывает меньшее влияние природно-климатических факторов на накопление

остаточных деформаций, в частности пучения грунтов земляного полотна, при наличии в конструкции асфальтобетонного слоя.

Таблица 2

**Оценка равномерности остаточной деформации
(по внешней рельсовой нити)**

Участок / цикл	Средняя величина остаточной деформации, мм	Среднеквадратическое отклонение остаточной деформации от средней величины	Коэффициент вариации
Контрольный участок			
Цикл 1	0,32	0,53	1,66
Цикл 2	0,18	1,58	5,26
Цикл 3	0,83	2,00	1,98
Цикл 4	0,24	1,33	4,6
Цикл 5	-1,94	1,13	0,58
Цикл 6	-2,58	1,17	0,46
Цикл 7	-2,19	1,06	0,47
Цикл 8	-0,94	0,81	0,87
Экспериментальный участок			
Цикл 1	-0,6	0,45	0,75
Цикл 2	-0,55	0,45	0,80
Цикл 3	-0,33	0,36	1,11
Цикл 4	-0,66	0,29	0,44
Цикл 5	-1,43	1,03	0,72
Цикл 6	-1,38	0,95	0,69
Цикл 7	-1,56	0,50	0,32
Цикл 8	-2,34	0,96	0,41

Заключение

Абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна составили:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя – (-4,9 мм);
- на контролльном участке – (-3,6 мм).

Темп накопления остаточных деформаций составил:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя – 0,427 мм / млн. тонн брутто пропущенного тоннажа;
- на контролльном участке – 1,197 мм / млн. тонн брутто пропущенного тоннажа.

Неравномерность остаточных деформаций земляного полотна:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя коэффициент вариации находится в диапазоне 0,32...1,11;
- на контролльном участке коэффициент вариации находится в диапазоне 0,47...5,26.

На участке с асфальтобетоном процессы пучения грунтов земляного полотна практически отсутствуют, в продольном направлении наблюдается стабильное положение рельсовых нитей.

Обеспечивается стабильность земляного полотна и балластного слоя за счет снижения величины накопленной остаточной деформации основной площадки земляного полотна.

Из всего выше сказанного следует, что устройство подбалластного слоя из асфальтобетона обеспечивает гидроизоляцию подстилающих грунтов земляного полотна, соответственно, практически сводит к минимуму риски появления деформаций морозного пучения, улучшает влажностный режим подстилающих грунтов, минимизирует снижение их прочностных и деформационных свойств в годовом цикле, обеспечивая тем самым повышение несущей способности, устойчивости земляного полотна и обеспечение стабильности рельсовой колеи с наработкой тоннажа.

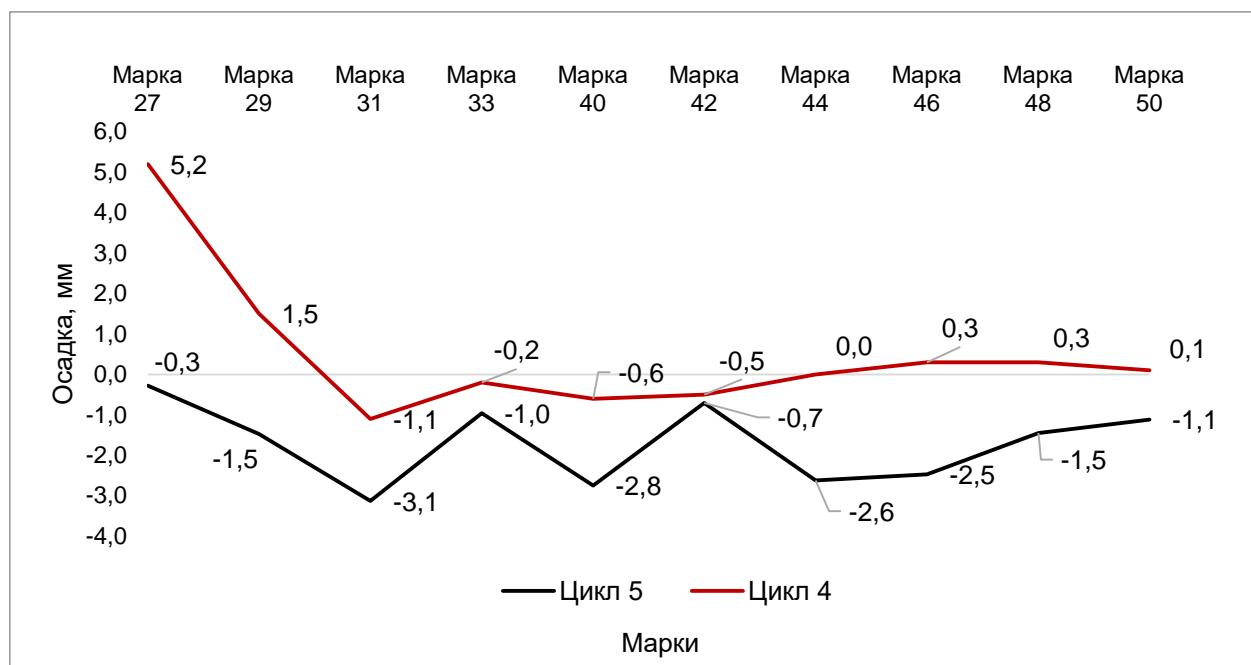


Рис. 11. Процесс сезонного пучения грунтов на контрольном участке

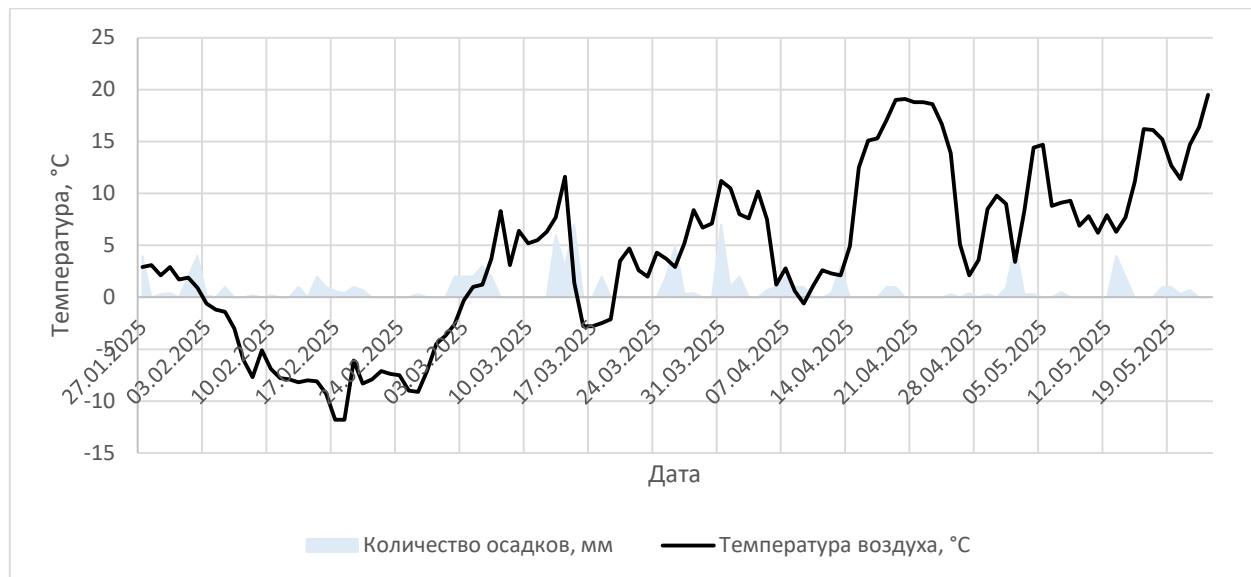


Рис. 12. График изменения температуры воздуха, количества осадков на период наблюдений

Список литературы

1. Cao Taiping. Study on Frost Heave Deformation Characteristics of Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region // Railway Investigation and Surveying. 2019. 45(01). P. 59-62. (in Chinese).
2. CAI De-gou. Test on Frost Heaving Spatial-Temporal Distribution of High Speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region // China Railway Science. 2016. 37(03). P. 16-21. (in Chinese).
3. Luo Qinglin. Frost Heave Prevention Technology of Lanzhou-Xinjiang Passenger Dedicated Line // High Speed Railway Technology. 2017. 8(S1). P. 132-139. (in Chinese).
4. Li, D., Rose J. G., LoPresti J. Test of hot-mix asphalt trackbed over soft subgrade under heavy axle loads // Technology Digest – Timely Technology Transfer. 2001. Vol. 01. P. 9.
5. Колос, А.Ф. Эффективность применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути / А.Ф. Колос, Е.Н. Симчук, Н.В. Быстров, Е.И. Шехтман, В.А. Черняева, Я.В. Мельник, С. Ван // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 12. С. 23-26.
6. Афонин Д.А., Богомолова Н.Н., Брынь М.Я., Никитчин А.А. Опыт геодезического контроля деформаций железнодорожных насыпей при испытаниях тяжеловесных вагонов // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 4. С. 60-68.

References

1. Cao Taiping. Study on Frost Heave Deformation Characteristics of Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region / Cao Taiping // Railway Investigation and Surveying. 2019. 45(01). P. 59-62. (in Chinese).
2. CAI De-gou. Test on Frost Heaving Spatial-Temporal Distribution of High Speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region / CAI De-gou // China Railway Science. 2016. 37(03). P. 16-21. (in Chinese).
3. Luo Qinglin. Frost Heave Prevention Technology of Lanzhou-Xinjiang Passenger Dedicated Line / Luo Qinglin // High Speed Railway Technology. 2017. 8(S1). P. 132-139. (in Chinese).
4. Li, D., Rose J. G., LoPresti J. Test of hot-mix asphalt trackbed over soft subgrade under heavy axle loads // Technology Digest – Timely Technology Transfer. 2001. Vol. 01. P. 9.
5. Kolos, A.F. et. al. The effectiveness of using a ballast layer of asphalt concrete in track structures / A.F. Kolos, E.N. Simchuk, N.V. Bystrov, E.I. Shekhtman, V.A. Chernyaeva, Ya.V. Melnik, S. Van Track and track management. 2023. No. 12. pp. 23-26.
6. Afonin D.A., Bogomolova N.N., Bryn M.Ya., Nikitchin A.A. Experience of geodetic control of railway embankment deformations during testing of heavy wagons // Engineering surveys. 2019. Vol. 13. No. 4. pp. 60-68.

Воздействие металлургического производства на окружающую среду

УДК 504.06

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0016>

Номер статьи: C0016

Кузьмин Евгений Олегович

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
ассистент

Белгород, Россия

SPIN: 8722-1231

kuzmin9731@mail.ru

Сапронова Жанна Ануаровна

д-р техн. наук., доцент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Белгород, Россия

SPIN: 7817-4790

sapronova.2016@yandex.ru

Лукьяненко Никита Олегович

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
аспирант

Белгород, Россия

niklu03@gmail.com

Статья получена: 31.10.2025. Одобрена: 26.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статьи является комплексный анализ воздействия металлургического производства на окружающую среду на всех технологических этапах и обоснование путей минимизации экологического ущерба на принципах циркулярной экономики и «зеленой» металлургии. В исследовании использованы методы системного анализа научной литературы, сравнительная оценка эффективности различных технологий переработки, включая гидро- и пирометаллургические методы, механохимическую активацию. Установлено, что негативное воздействие носит системный характер, проявляясь на этапах добычи сырья и его металлургического передела. Выявлен значительный ресурсный потенциал техногенных отходов (хвостов обогащения, шлаков, металлургических пылей). Научно обоснована и показана высокая эффективность инновационных технологий, таких как выщелачивание с механохимической активацией, позволяющее извлекать из отходов до 50–80% потерянных металлов, и комплексная переработка пылей электродуговой печи. Результаты работы позволяют сформировать научно-методическую базу для разработки и внедрения природоохранных мероприятий на металлургических предприятиях. Предложенные технологические решения направлены на сокращение объема захораниваемых отходов, снижение выбросов и расширение минерально-сырьевой базы за счет вторичных ресурсов, что способствует повышению экологической и экономической устойчивости отрасли.

Ключевые слова: металлургическое производство, циркулярная экономика, техногенные отходы, переработка шлаков, хвосты обогащения, выщелачивание, экологическая безопасность

The environmental impact of metallurgical production

Kuzmin Yevgeniy Olegovich

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Assistant
Belgorod, Russian Federation
kuzmin9731@mail.ru

Sapronova Zhanna Anuarovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Belgorod, Russian Federation
sapronova.2016@yandex.ru

Lukyanenko Nikita Olegovich

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Postgraduate Student
Belgorod, Russian Federation
niklu03@gmail.com

Abstract. The objective of this article is a comprehensive analysis of the impact of metallurgical production on the environment at all technological stages and justification of ways to minimize environmental damage based on the principles of circular economy and "green" metallurgy. The study uses methods of systematic analysis of scientific literature, a comparative assessment of the effectiveness of various processing technologies, including hydro- and pyrometallurgical methods, and mechanochemical activation. It has been established that the negative impact is systemic, manifesting itself at the stages of extraction of raw materials and its metallurgical conversion. A significant resource potential of man-made waste (enrichment tailings, slags, metallurgical dust) has been identified. The high efficiency of innovative technologies, such as leaching with mechanochemical activation, which makes it possible to extract up to 50-80% of lost metals from waste, and complex processing of electric arc furnace dust, has been scientifically substantiated and demonstrated. The results of the work make it possible to form a scientific and methodological basis for the development and implementation of environmental protection measures at metallurgical enterprises. The proposed technological solutions are aimed at reducing the amount of waste being buried, reducing emissions and expanding the mineral resource base through secondary resources, which contributes to improving the environmental and economic sustainability of the industry.

Keywords: Metallurgical production, circular economy, man-made waste, slag processing, enrichment tailings, leaching, environmental safety

Введение

Ключевая роль металлургии в становлении и развитии человеческой цивилизации неоспорима. Именно с освоением металлов связаны важнейшие технологические прорывы в истории, заложившие основу современного промышленного ландшафта. Однако индустриальная мощь, которую обеспечивает эта отрасль, имеет и обратную, глубоко противоречивую сторону, проявляющуюся в масштабном и зачастую необратимом преобразовании природных систем [1]. Процессы извлечения металла из руды и его последующей переработки сопряжены с образованием значительного количества веществ, поступающих в атмосферу, водные объекты и почву, формируя комплексное негативное воздействие на окружающую среду [2]. Это воздействие носит многокомпонентный характер, начиная от глобальных последствий, таких как выбросы парниковых газов, способствующих изменению климата, и заканчивая локальными трансформациями, когда территории вблизи металлургических гигантов испытывают на себе всю тяжесть

производственной деятельности. Воздушный бассейн принимает на себя выбросы взвешенных частиц, оксидов серы и азота, тяжелых металлов. Водные ресурсы истощаются за счет колоссального водопотребления и загрязняются стоками, содержащими растворенные соли, металлы и реагенты. Накопление огромных объемов твердых отходов — шлаков, шламов, — приводит к отчуждению земель и созданию долговременных источников потенциального загрязнения.

Методы

В рамках исследования применялись методы системного анализа научной литературы, сравнительная оценка эффективности различных технологий переработки, включая гидрометаллургические и пиromеталлургические методы, а также механохимическую активацию.

Результаты

Воздействие металлургического производства на окружающую среду логично рассматривать, выделяя два основных технологических этапа: первичный, связанный с добычей и подготовкой сырья, и последующий, заключающийся в его металлургической переработке [3]. Начальная стадия, включающая добычу руд и угля, а также их обогащение, задает масштаб антропогенной нагрузки на природные системы, последствия которой часто носят необратимый характер. На этапе добычи и подготовки сырья происходит кардинальное преобразование территории. Создание карьеров и разрезов приводит к полному уничтожению естественных почвенных покровов и растительных сообществ, нарушению гидрологического режима местности и формированию глубоких техногенных ландшафтов [4]. Извлечение и складирование вскрышных пород сопровождается образованием обширных отвалов и хвостохранилищ, которые не только отчуждают значительные земельные площади, но и становятся постоянными источниками пылеобразования и химического загрязнения [5, 6]. С поверхности этих объектов под воздействием ветровой и водной эрозии происходит миграция взвешенных частиц и растворенных соединений тяжелых металлов, загрязняющих прилегающие почвы и водные объекты [7, 8]. Процесс обогащения руды, направленный на повышение содержания полезного компонента, связан с большими объемами водопотребления и образованием жидких отходов, сбрасываемых в хвостохранилища, что создает риски фильтрации и нарушения целостности этих сооружений [9]. Кроме того, дробление и измельчение руды, ее сортировка и транспортировка генерируют значительные выбросы пыли в атмосферный воздух, часто содержащей токсичные элементы, такие как свинец, кадмий и ртуть, которые накапливаются в экосистемах и представляют долговременную опасность [5]. Таким образом, даже до стадии плавки металлургический цикл инициирует масштабные изменения в окружающей среде, характеризующиеся нарушением земель, истощением и загрязнением водных ресурсов, а также химической нагрузкой на атмосферный воздух, что подтверждается исследованиями конкретных предприятий горно-металлургического комплекса [6]. Комплексная оценка этих рисков, как отмечают исследователи, является необходимым первым шагом для разработки эффективных природоохранных стратегий [3].

Ключевое воздействие на окружающую среду формируется на этапе металлургической переработки, который включает плавку, рафинирование и литье. Этот этап характеризуется комплексным негативным влиянием, основные аспекты которого структурированы в Таблице 1.

Таблица 1

Анализ воздействия этапа металлургической переработки на окружающую среду (составлено автором)

Направление воздействия	Характеристика и последствия	Источник
Выбросы атмосферу	Выбросы диоксида серы, оксидов азота, оксида углерода, бенз(а)пирена и пыли, содержащей тяжелые металлы (свинец, медь, цинк, никель, кадмий), приводящие к хронической интоксикации населения и превышению приемлемых уровней риска для здоровья.	[17], [18]
	Образование газопылевой фракции, содержащей природные и техногенные радионуклиды, которая при осаждении загрязняет почву, растительность и грунтовые воды, создавая риск внешнего и внутреннего облучения населения.	[16]
	Пыль очистки отходящих газов сталеплавильного производства, являющаяся источником вторичного загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.	[21]
	Выбросы диоксидов серы и азота, оксида углерода, оказывающие негативное влияние на компоненты сосновых насаждений в зоне влияния завода.	[17]
Образование промышленных отходов	Накопление шлаков, характеризующихся преобладанием силикатов и алюмосиликатов с включениями ферритных составляющих и остаточным содержанием цветных и тяжелых металлов, что представляет долговременную экологическую угрозу.	[10], [22]
	Образование техногенных месторождений (отвалов, шлаков), оказывающих комплексное негативное воздействие на все компоненты природной среды и требующих переработки или рекультивации.	[10]
	Накопление значительных объемов твердых отходов (в том числе шлаков и пыли), ведущее к отчуждению земель, пылению и фильтрации токсичных элементов в почву.	[11], [19]
	Образование окалины, использованных фильтров и других специфических отходов I-V классов опасности, требующих строгого учета, паспортизации и передачи аккредитованным организациям для переработки.	[19]
Потребление ресурсов термальное загрязнение	Высокое потребление воды, составляющее 15-20% от общего потребления промышленностью страны, и сброс загрязненных сточных вод, содержащих взвешенные частицы, масла, эмульсии и травильные растворы, что нарушает кислородный режим водоемов.	[11], [12]
	Высокое энергопотребление, обуславливающее значительные выбросы парниковых газов и необходимость перехода на наилучшие доступные технологии (НДТ) для повышения энергоэффективности.	[12], [14]
	Сброс условно-чистых стоков с повышенной температурой, вызывающий термальное загрязнение водоемов и нарушающий условия существования водных экосистем.	[11]

Проведенный анализ наглядно демонстрирует, что этап металлургической переработки создает значительную и многокомпонентную нагрузку на все среды: атмосферу, водные ресурсы и земельные площади. Накопление твердых отходов, в

особенности шлаков, формирует долгосрочные источники загрязнения. Это обуславливает острую необходимость в системном переходе к внедрению наилучших доступных технологий, развитию методов утилизации и переработки вторичных ресурсов в рамках концепции циркулярной экономики и «зеленой» металлургии.

Обсуждение

Актуальной тенденцией в развитии металлургической отрасли становится переход к принципам циркулярной экономики и «зеленой» металлургии, что подразумевает разработку и внедрение технологий, направленных на сокращение первичного ресурсопотребления и минимизацию образования отходов. Одним из перспективных направлений является комбинирование традиционных и новых технологий добычи и переработки руд, включая выщелачивание металлов непосредственно в подземных блоках, что позволяет повысить полноту извлечения полезных компонентов [23]. Особое внимание уделяется освоению техногенных месторождений – хвостов обогащения и других металлосодержащих отходов. Исследования демонстрируют эффективность механохимической активации процессов выщелачивания в дезинтеграторах, позволяющей извлекать от 50 до 80% металлов, ранее считавшихся безвозвратно потерянными [24, 26, 28]. Это не только упрочняет минерально-сырьевую базу, но и способствует решению острых экологических проблем горнодобывающих регионов.

Значительный потенциал снижения нагрузки на окружающую среду связан с комплексной переработкой специфических отходов металлургического производства. Например, для пылей электродуговой плавки, содержащих ценные металлы, разрабатываются и совершенствуются как пирометаллургические (например, вельц-процесс), так и более экологически безопасные гидрометаллургические методы, обеспечивающие селективное извлечение целевых компонентов [27]. Применение высококремнистых сплавов системы Al-Si открывает возможности для создания замкнутых производственных циклов в черной металлургии, позволяя многократно перерабатывать материал и снижать объемы образующихся отходов [25]. Современный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса предполагает их рассмотрение в качестве вторичных ресурсов, вовлечение которых в хозяйственный оборот является основой ресурсосбережения и приносит существенные экономические выгоды [29, 30]. Таким образом, формирование безотходных и малоотходных производственных процессов через внедрение наилучших доступных технологий становится ключевым фактором экологически устойчивого развития металлургии [31].

Многообразие разрабатываемых и внедряемых технологий позволяет систематизировать их по основным направлениям (см. Рис. 1).

Проведенный анализ свидетельствует о том, что современное развитие металлургии неразрывно связано с внедрением ресурсосберегающих и экологически ориентированных технологий. Наиболее перспективными являются методы, позволяющие не только снизить текущее негативное воздействие, но и ликвидировать накопленный экологический ущерб за счет вовлечения техногенных отходов в хозяйственный оборот. Комплексный подход, сочетающий гидро- и пирометаллургические процессы с механохимической активацией и созданием замкнутых производственных циклов, формирует основу для перехода к циркулярной экономике в металлургическом комплексе. Дальнейшая работа должна быть направлена на оптимизацию этих технологий, обеспечение их экономической целесообразности и создание необходимой нормативно-правовой базы для стимулирования их широкого промышленного внедрения.

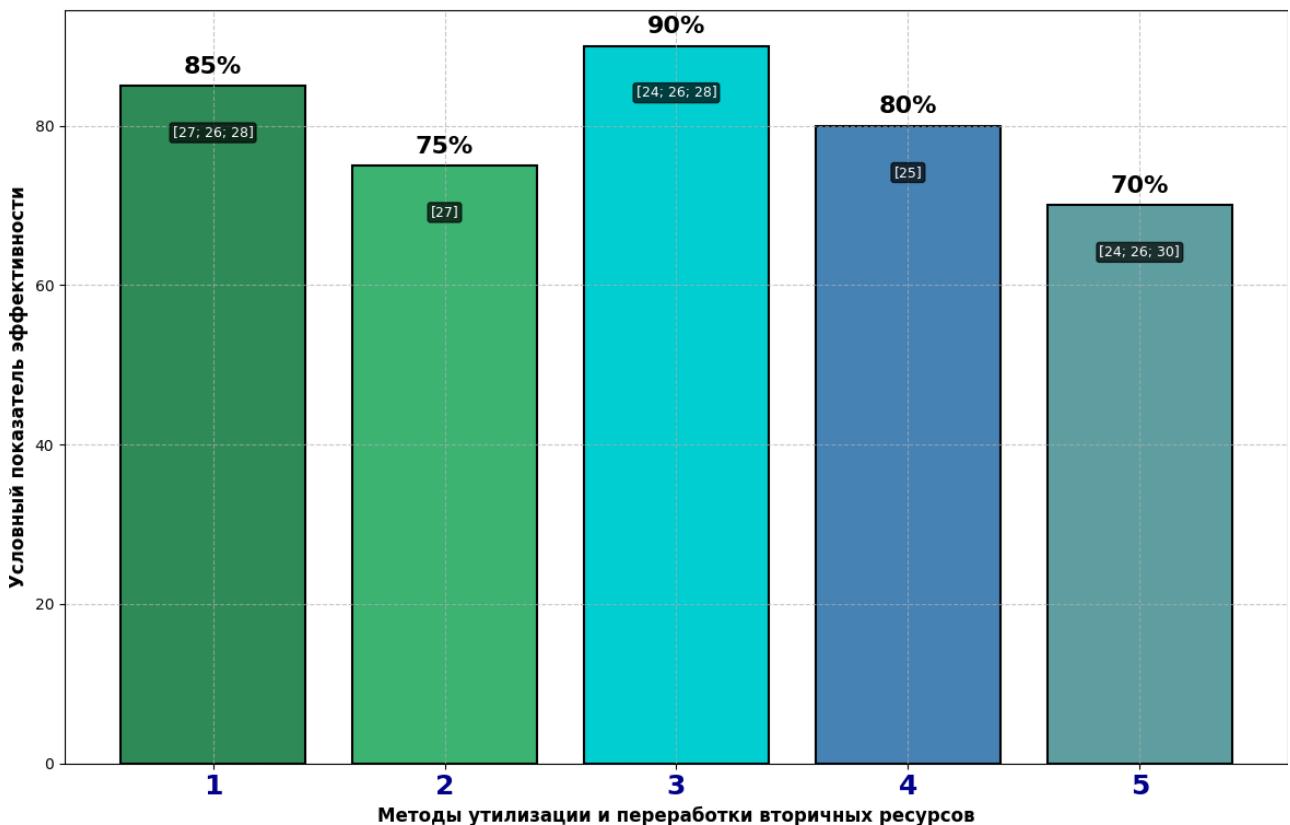


Рис. 1. Систематизация методов утилизации и переработки вторичных ресурсов в металлургии:

1. Гидрометаллургические и комбинированные методы;
2. Пирометаллургические методы;
3. Механохимическая активация;
4. Рециклинг и замкнутые циклы;
5. Комплексная утилизация и использование в строительстве
(составлено автором на основании [23-31])

Список литературы

1. Романович А. А., Орехова Т. Н., Мещеряков С. А., Прокопенко В. С. Технология получения минеральных добавок // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 188-192.
2. Вареникова Т. А., Смирнова М. А., Дороганов В. А. Корундовые легковесные оgneупоры на основе гидравлических вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 64-69.
3. Турсукова И. И., Байметова М. Г. Методический подход к оценке эффективности деятельности металлургического предприятия в условиях экологических рисков // Экономика, предпринимательство и право. 2024. Т. 14. №. 3. С. 277-288.
4. Медведева И. В., Амирова Е. В., Студенок Г. А., Цейтлин Е. М., Медведева О. М. Воздействие предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду и направления его снижения // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. №. 4 (72). С. 116-126.
5. Мурзин М. А., Тепина М. С. Влияние металлургического производства на состояние окружающей среды // Металлург. 2022. Т. 2. С. 51-54.
6. Абраменко Д. С. Оценка влияния металлургических заводов на окружающую среду (на примере Ульбинского металлургического завода) // Междисциплинарные подходы в биологии, медицине и науках о Земле: теоретические и прикладные аспекты. 2023. С. 186-189.

7. Паукова Ю. С., Зубарева К. С. Экологические проблемы взаимодействия металлургического производственного комплекса с окружающей средой // Качество в производственных и социально-экономических системах. 2021. С. 99-103.
8. Размахнин К. К., Хатькова А. Н., Шумилова Л. В. Сорбционные технологии как инструмент экологической безопасности металлургического производства // Металлургия цветных, редких и благородных металлов. 2022. С. 287-290.
9. Когденко В. Г., Казакова Н. А. Обоснование параметров экологической безопасности и устойчивости развития металлургического производства // Проблемы прогнозирования. 2023. №. 1. С. 169-181.
10. Макаров А. Б., Талалай А. Г., Гуман О. М., Хасанова Г. Г. Техногенные месторождения и особенности их воздействия на природную окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. Т. 3. С. 120-129.
11. Турашев Б. М., Ермуханова С. Т. Экологические проблемы черной металлургии и методы ее снижения // Endless light in science. 2025. №. 28 февраль ЭН. С. 44-47.
12. Григорьева Е. Е., Файфер И. Н. Основные источники экологических проблем металлургического комплекса в Российской Федерации и возможные пути их решения // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2022). Екатеринбург, 2022. 2022. С. 69-74.
13. Глушковская Н. Б., Тритенко А. М. Развитие металлургического производства на Кольском полуострове // Исторический подход в географии и геоэкологии. 2023. С. 210-215.
14. Федорова В. С., Маланина О. В. «Зеленая» металлургия как способ экологически чистого производства // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная. 2021. С. 326-330.
15. Юркевич Н. В. И др. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района / Н. В. Юркевич, И. Н. Ельцов., В. Н. Гуреев, Н. А. Мазов, Н. В. Юркевич, А. В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332. №. 12. С. 230-249.
16. Валуев Н. П., Машинцов Е. А., Юданов П. М. Техногенное воздействие радиоактивного загрязнения продуктов плавки металла на окружающую среду и население // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2021. №. 1. С. 3-13.
17. Сосновский Е. Я., Смердов П. Е., Астафьев А. М., Астафьева О. М. Влияние выбросов металлургического завода на компоненты сосновых насаждений в зоне сильного поражения // XXV Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартовского государственного университета (г. Нижневартовск, 4-5 апреля 2023 г.) / Под общей ред. Д.А. Погонышева. Ч. 1. Биология. Экология. География. Безопасность жизнедеятельности. Нижневартовск: изд-во НВГУ, 2023. С. 145.
18. Кислицына В. В., Суржиков Д.В., Голиков Р.А., Корсакова Т.Г. Оценка риска для здоровья населения промышленного города от влияния выбросов металлургического предприятия // Медицина в Кузбассе. 2022. Т. 21. №. 3. С. 75-79.
19. Зассеев А. А., Зассеева Л. А. Охрана окружающей среды посредством утилизации отходов металлургического производства // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. 2021. С. 35-37.
20. Нахичеванская Н. В., Коротков В. В., Трухина Г. М., Савельев С. И. Изучение специфики влияния развитой металлургической промышленности в индустриальном центре на здоровье населения // Здравоохранение Российской Федерации. 2022. Т. 66. №. 2. С. 152-159.
21. Алиева Э. Р., Доценко Н. В. Пыль очистки отходящих газов сталеплавильного производства и ее влияние на окружающую среду // Образование. Наука. Производство. 2021. С. 1366-1369.
22. Тлеуова С. Т., Шингисбаева Ж. А., Мисюченко В. М., Алтынбек А. Анализ экологического воздействия отходов металлургии на окружающую среду // Научно-

образовательные дискуссии: фундаментальные и прикладные исследования. 2021. С. 44-49.

23. Голик В. И., Титова А. В. Упрочнение ресурсной базы metallurgии комбинированием технологий добычи руд // Горная промышленность. 2022. №. 5. С. 105-111.

24. Голик В. И., Титова А. В. Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии // Горная промышленность. 2024. №. 3. С. 77-84.

25. Шляров В. В., Шлярова Ю. А., Башенко Л. П., Загуляев Д. В. Уменьшение количества отходов и внедрение экологически безопасных и эффективных производственных процессов при использовании высококремнистых сплавов системы Al-Si // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2025. Т. 68. №. 3. С. 239-247.

26. Титова А. В., Голик В. И. Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии // Горная промышленность. 2021. №. 1. С. 61-68.

27. Топоркова Ю. И., Блудова Д., Мамяченков С. В., Анисимова О. С. Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. №. 5 (160). С. 643-680.

28. Голик В. И., Клюев Р. В., Зюкин Д. А., Карлина А. И. Перспективы возвращения потерянных в хвостах переработки руд ценных компонентов цветных металлов // Металлург. 2023. №. 1. С. 92-97.

29. Литвинова Т. Е., Сучков Д. В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минеральносырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. №. 6-1. С. 331-348.

30. Лепков А. С., Луковцева А. К. Ресурсосбережение и экономические выгоды вторичной переработки // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. 2021. №. 1. С. 167-175.

31. Ульева Г. А., Туысхан К., Мацугина Е. М., Волокитина И. Е., Ахметова Г. Е. Современное состояние проблемы утилизации отходов производства // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2025. Т. 68. №. 2. С. 131-138.

References

1. A. A. Romanovich, T. N. Orekhova, S. A. Meshcheryakov, V. S. Prokopenko Technology of obtaining mineral additives // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. - 2015. – No. 5. – pp. 188-192.
2. T. A. Varenikova, M. A. Smirnova, V. A. Doroganov Corundum lightweight refractories based on hydraulic binders // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. - 2017. – No. 5. – pp. 64-69.
3. Tursukova I. I., Baymetova M. G. Methodological approach to assessing the effectiveness of a metallurgical enterprise in the context of environmental risks // Economics, entrepreneurship and law. – 2024. – Vol. 14. – No. 3. – pp. 277-288. (In Russian)
4. Medvedeva I. V., Amirova E. V., Studenok G. A., Tseitlin E. M., Medvedeva O. M. The impact of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region on the environment and ways to reduce it // Proceedings of the Ural State Mining University. – 2023. – №. 4 (72). – pp. 116-126. (In Russian)
5. Murzin M. A., Tepina M. S. The impact of metallurgical production on the environment // Metallurgist. – 2022. – Vol. 2. – pp. 51-54. (In Russian)
6. Abramenko D. S. Assessment of the impact of metallurgical plants on the environment (on the example of the Ulba Metallurgical Plant) // Interdisciplinary approaches in biology, medicine and Earth sciences: theoretical and applied aspects. - 2023. – pp. 186-189. (In Russian)
7. Paukova Yu.S., Zubareva K. S. Ecological problems of interaction of the metallurgical production complex with the environment] // Quality in production and socio-economic systems. – 2021. pp. 99-103. (In Russian)
8. Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Shumilova L. V. Sorption technologies as an instrument of environmental safety of metallurgical production // Metallurgy of non-ferrous, rare and precious metals. – 2022. pp. 287-290. (In Russian)

9. Kogdenko V. G., Kazakova N. A. Substantiation of environmental safety parameters and sustainability of metallurgical production development // Forecasting problems. – 2023. – No. 1. – pp. 169-181. (In Russian)
10. Makarov A. B., Talalai A. G., Guman O. M., Khasanova G. G. Technogenic deposits and features of their impact on the natural environment // News of higher educational institutions. Mining Journal. – 2022. – Vol. 3. – pp. 120-129. (In Russian)
11. Turashev B. M., Ermukhanova S. T. Environmental problems of ferrous metallurgy and methods of its reduction // Endless light in science. – 2025. – No. 28 February ED. – pp. 44-47. (In Russian)
12. Grigorieva E. E., Fifer I. N. The main sources of environmental problems of the metallurgical complex in the Russian Federation and possible ways their solutions // Thermal engineering and computer science in education, science and production (TIM'2022). Yekaterinburg, 2022. – 2022. – pp. 69-74. (In Russian)
13. Glushkovskaya N. B., Tritenko A.M. Development of metallurgical production on the Kola Peninsula // Historical approach in geography and geoecology. – 2023. pp. 210-215. (In Russian)
14. Fedorova V. S., Malanina O. V. «Green» metallurgy as a method of environmentally friendly production //The environment surrounding a person: natural, man-made, social. - 2021. – pp. 326-330. (In Russian)
15. Yurkevich N. V. et. al. Anthropogenic impact on the environment in the Russian Arctic on the example of the Norilsk industrial region / N. V. Yurkevich, I. N. Yeltsov, V. N. Gureev, N. A. Mazov, N. V. Yurkevich, A.V. Edelev //Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2021. Vol. 332. no. 12. pp. 230-249. (In Russian)
16. Valuev N. P., Mashintsov E. A., Yudanov P.M. Technogenic effect of radioactive contamination of metal smelting products on the environment and the population // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. – 2021. – №. 1. – pp. 3-13. (In Russian)
17. Sosnovsky E. Ya., Smerdov P. E., Astafiev A.M., Astafieva O. M. The effect of emissions from a metallurgical plant on the components of pine plantations in the heavily affected area // XXV All-Russian Student Scientific and Practical Conference of Nizhnevartovsk State University (Nizhnevartovsk, April 4-5, 2023) / General editor D.A. Pogonyshov. Part 1. Biology. Ecology. Geography. Life Safety. Nizhnevartovsk: NVSU Publishing House, 2023. P. 145. (In Russian)
18. Kislitsyna V. V., Surzhikov D.V., Golikov R.A., Korsakova T.G. Assessment the risk to the health of the population of an industrial city from the impact of emissions from a metallurgical enterprise]// Medicine in Kuzbass. – 2022. – Vol. 21. – No. 3. – pp. 75-79. (In Russian)
19. Zasseev A. A., Zasseeva L. A. Environmental protection through waste disposal of metallurgical production // Current trends in the development of information technologies in scientific research and applied fields. – 2021. pp. 35-37. (In Russian)
20. Nakhichevanskaya N. V., Korotkov V. V., Trukhina G. M., Savelyev S. I. Studying the specifics of the impact of the developed metallurgical industry in the industrial center on public health] // Healthcare of the Russian Federation. – 2022. – Vol. 66. – No. 2. – pp. 152-159. (In Russian)
21. Alieva E. R., Dotsenko N. V. Waste gas purification dust from steelmaking and its impact on the environment // Education. Science. Production. – 2021. – pp. 1366-1369. (In Russian)
22. Tleuova S. T., Shingisbayeva Zh. A., Misyuchenko V. M., Altynbek A. Analysis of the environmental impact of metallurgical waste on the environment // Scientific and educational discussions: fundamental and applied research. – 2021. pp. 44-49. (In Russian)
23. Golik V. I., Titova A.V. Strengthening the resource base of metallurgy by combining ore mining technologies // Mining industry. – 2022. – No. 5. – pp. 105-111. (In Russian)
24. Golik V. I., Titova A.V. Prospects of increasing the mineral base of non-ferrous metallurgy // Mining industry. – 2024. No. 3. pp. 77-84. (In Russian)
25. Shlyarov V. V., Shlyarova Yu. A., Baschenko L. P., Zagulyaev D. V. Waste reduction and introduction of environmentally safe and efficient production processes using high-silicon

- alloys of the Al-Si system // News of higher educational institutions. Ferrous Metallurgy. – 2025. – Vol. 68. – No. 3. – pp. 239-247. (In Russian)
26. Titova A.V., Golik V. I. Perspektivy uvelicheniya mineral'noj bazy cvetnoj metallurgii // Mining industry. – 2021. – No. 1. – pp. 61-68. (In Russian)
27. Toporkova Yu. I., Bludova D., Mamyachenkov S. V., Anisimova O. S. Review of methods for processing electric arc melting dusts // iPolytech Journal. – 2021. – Vol. 25. – №. 5 (160). – pp. 643-680. (In Russian)
28. Golik V. I., Klyuev R. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Prospects for the return of valuable components of non-ferrous metals lost in the tailings of ore processing // Metallurgist. – 2023. – №. 1. – pp. 92-97. (In Russian)
29. Litvinova T. E., Suchkov D. V. An integrated approach to the disposal of man-made waste from the mineral resource complex // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). - 2022. – No. 6-1. – pp. 331-348. (In Russian)
30. Lepkov A. S., Lukovtseva A. K. Resource conservation and economic benefits of recycling // Fundamental and applied research of the cooperative sector of the economy. – 2021. – No. 1. – pp. 167-175. (In Russian)
31. Uleva G. A., Tuyskhan K., Matsugina E. M., Volokitina I. E., Akhmetova G. E. The current state of the problem of industrial waste disposal // News of higher educational institutions. Ferrous Metallurgy. – 2025. – Vol. 68. – No. 2. – pp. 131-138. (In Russian)

Современные системы фасадной отделки на основе известковых штукатурок

УДК 692.232

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0017>

Номер статьи: C0017

Майер Роман Алексеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Архитектурно-строительное проектирование», аспирант
Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 6807-2221

maier@agiogk.ru

Шангина Нина Николаевна

д-р техн. наук, профессор

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Архитектурно-строительное проектирование», заведующий кафедрой
Санкт-Петербург, Россия
shangina@agiogk.ru

Харитонов Алексей Михайлович

д-р техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Технологии строительных материалов и метрология», профессор

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3780-0180

haritonov@agiogk.ru

Статья получена: 03.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статьи стало выявление эффективных систем материалов на основе известковых вяжущих для отделки фасадов кирпичных зданий. Задачей исследований являлось определение степени влияния вида накрывочного слоя и финишного покрытия на паропроницаемость и поверхностное водопоглощение, которые напрямую или косвенно определяют эксплуатационные характеристики отделки и ограждающих конструкций. В исследованиях рассмотрены трехслойные штукатурные системы, включающие: штукатурный грунт, накрывку или шпаклевочный состав, а также минеральную краску. Произведена экспериментальная сравнительная оценка систем отделки, отличающихся способами финишного выравнивания и видом краски, по величине паропроницаемости и поглощающей способности поверхности отделки. Паропроницаемость определялась стандартным методом, а поглощающая способность поверхности – на основе применения градуированных стеклянных трубок (трубки Карстена). Показано, что устройство шпаклевочных слоев взамен мелкозернистых накрывочных штукатурных способствует снижению паропроницаемости и замедлению скорости миграции влаги через слои отделки. Это обуславливает риск повышения влажности и, соответственно, снижения энергоэффективности ограждающих конструкций. Выявлено, что гидрофобизация окрасочного слоя не оказывает значительного влияния на паропроницаемость. При этом существенно снижается впитывающая способность поверхности, что может быть использовано для систем отделки, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенной атмосферной влажности. Результаты проведенных исследований являются основой для выработки научно обоснованных рекомендаций по

подбору систем отделочных материалов, обеспечивающих требуемый межремонтный срок эксплуатации отделки кирпичных фасадов, а также поддерживающих в ограждающих конструкциях уровень влажности, не превышающий допустимых эксплуатационных значений.

Ключевые слова: известковая штукатурка, кирпичные фасады, системы отделочных материалов, минеральная краска, паропроницаемость, водопоглощение поверхности.

Modern facade finishing system based on lime plasters

Mayer Roman Alekseevich

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University,
Department of Architectural and Construction Design, PhD student
Saint Petersburg, Russian Federation
maier@agiogk.ru

Shangina Nina Nikolaevna

Doctor of Technical Sciences, professor,
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University,
Department of Architectural and Construction Design, Head of the Department
Saint Petersburg, Russian Federation
shangina@agiogk.ru

Kharitonov Alexey Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, docent,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Department of «Building Materials Technology and Metrology», Professor
Saint Petersburg, Russian Federation
haritonov@agiogk.ru

Abstract. The objective of the article is to identify effective material systems based on lime binders for finishing the facades of brick buildings. The research task was to determine the degree of influence of the type of leveling layer and the finish coating on water vapor permeability and surface water absorption, which directly or indirectly define the operational characteristics of the finish and enclosing structures. Three-layer plastering systems were studied, including a plaster base coat, a leveling or putty composition, and a mineral paint. An experimental comparative assessment of finishing systems differing in their finishing smoothing methods and paint types was carried out in terms of vapor permeability and surface absorption capacity of the finish. Vapor permeability was determined by a standard method, and surface absorption capacity was measured using graduated glass tubes (Karsten tubes). It was shown that using putty layers instead of fine-grained leveling plasters leads to reduced vapor permeability and slows moisture migration through the finish layers. This creates a risk of increased moisture content and, consequently, reduced energy efficiency of the enclosing structures. It was found that hydrophobization of the paint layer does not significantly affect vapor permeability. However, it substantially reduces surface absorption capacity, which can be utilized in finishing systems intended for operation under high atmospheric humidity conditions. The results of these studies form the basis for developing scientifically grounded recommendations for selecting finishing material systems that ensure the required maintenance-free service life of brick facade finishes, as well as maintaining moisture levels in the enclosing structures within permissible operational values.

Keywords: lime plaster, brick facades, finishing material systems, mineral paint, vapor permeability, surface water absorption.

Введение

Долговечность отделки фасадов кирпичных зданий во многом определяется совместимостью с основанием и сбалансированностью характеристик элементов применяемых штукатурных систем. Традиционные известковые растворы характеризуются высокой паропроницаемостью, что способствует эффективному отводу влаги из ограждающих конструкций [1-3]. Однако, низкая прочность и недостаточная водоотталкивающая способность приводят к преждевременному появлению трещин, высолов и биопоражений. На практике дефекты штукатурного слоя фиксируются уже через 5-7 лет после ремонта, тогда как нормативный межремонтный срок для фасадных покрытий составляет не менее 25-30 лет [4]. Такой дисбаланс между ожидаемым и фактическим сроком службы фасадных отделок обусловлен несовершенством существующих методик подбора материалов и отсутствием комплексной оценки их взаимодействия в составе целостной системы, включающей основание.

Рост эксплуатационных нагрузок и ужесточение требований в части энергетической эффективности ограждающих конструкций обуславливает актуальность разработки комплексного подхода, обеспечивающего одновременно достаточный уровень прочности, оптимальную паропроницаемость и повышенную водостойкость штукатурных систем. Немаловажным также является улучшение технологичности известковых материалов для повышения производительности отделочных работ.

В основе такого подхода лежит согласование физических, механических и гигрометрических характеристик каждого слоя от основания до финишного покрытия, а также учет климатических условий эксплуатации. Интеграция пущолановых добавок, силикатных покрытий и гидрофобизирующих компонентов позволяет существенно расширить функциональные возможности традиционных составов с сохранением их положительных качеств, например, паропроницаемости [5-7].

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния на гидрофизические свойства известковых отделочных систем применения шпаклевочных составов взамен традиционных накривочных, использования силикатных окрасочных покрытий вместо известковых. Кроме этого, оценивалась возможность применения гидрофобизирующих добавок в составе силикатных красок и нанесения гидрофобизирующих составов на поверхность известковой краски.

Актуальность исследований

Опыт применения для отделки фасадов кирпичных зданий систем материалов, включающих цементные штукатурные растворы и краски на основе синтетических пленкообразующих, показал чрезвычайную важность совместимости отделки и основания по величине паропроницаемости, а также деформативности [8, 9]. Этот факт заставляет вновь обратить внимание на традиционные отделочные материалы для подобных зданий – известковые растворы и минеральные краски.

Известно, что растворы на основе извести имеют модуль упругости порядка 0,5-1,0 ГПа и прочность при сжатии до 2 МПа, а их паропроницаемость варьируется от 0,11 до 0,18 мг/(м·ч·Па) [10], что соответствует характеристикам кирпичной кладки и позволяет обеспечить совместность деформаций и эффективно миграцию из конструкций избыточной влаги. Вместе с тем, отсутствие водостойкости у известковых составов ведёт к быстрому насыщению водой при атмосферных осадках, что ускоряет не только разрушение структуры раствора и образованию трещин в штукатурном слое, но и к насыщению кирпича влагой.

При решении указанной проблемы основное внимание уделяется применению пущолановых добавок, которые при дозировках 10-20% от массы вяжущего способствуют увеличению прочности раствора до 3-4 МПа, повышению водостойкости и химической стойкости к агрессивным средам (CO₂, SO₂) [11]. При этом не происходит существенного снижения паропроницаемости растворов: значения данного показателя находятся в диапазоне 0,10-0,15 мг/(м·ч·Па).

В качестве финишного покрытия для известковых штукатурных систем на протяжении веков применялись известковые краски [12]. Несмотря на исторически доказанную эффективность, применение известковых красок в современных условиях сталкивается с рядом существенных ограничений, которые снижают их актуальность. Известковые краски требуют строгого соблюдения технологии нанесения и достаточно высокого уровня квалификации исполнителя [13]. Процесс нанесения трудоемкий и чувствителен к погодным условиям. Всё вышеперечисленное делает их неприемлемым для массового интенсивного строительства.

На наш взгляд, наилучшей физико-химической совместимостью с известковыми штукатурными системами характеризуются силикатные грунты и краски. Силикатные составы образуют на поверхности прочную мембрану с высокими адгезионными свойствами и паропроницаемостью [6], а применение в составе красок гидрофобизирующих добавок позволяет снизить поверхностное водопоглощение на 20-30%. Сочетание пущолановых добавок и силикатных покрытий с гидрофобизирующими компонентами позволяет обеспечить баланс между паропроницаемостью отделки и её защитными функциями в отношении атмосферных факторов.

К настоящему времени выполнены многочисленные исследования по определению влияния различных факторов на работоспособность штукатурной фасадной отделки [14], однако представляется недостаточной систематизация полученных результатов для формирования единой методики комплексного подбора системы отделочных материалов. Существующие стандарты регламентируют методы испытаний паропроницаемости, прочности и водопоглощения, но не предлагают алгоритма оценки совместимости материалов. Это обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований с целью обобщенной оценки эффективности системы материалов, для различных климатических условий и типов фасадов, учитывая взаимодействие отделочных слоёв и эксплуатационных особенностей кирпичных ограждающих конструкций.

Материалы и методы

Для проведения испытаний применены два варианта отделочных систем:

Системы 1, 2: крупнозернистый известковый выравнивающий раствор, мелкозернистый известковый накрывочный раствор;

Система 3: крупнозернистый известковый выравнивающий раствор, мелкодисперсный известково-пущолановый накрывочный раствор;

В каждой системе принято четыре вида подсистем:

а — отделочная система без покрытия краской;

б — отделочная система, покрытая силикатной грунтовкой;

с — отделочная система, покрытая силикатной грунтовкой и окрашенная силикатной краской (для системы 1 — известковая краска);

д — отделочная система, покрытая силикатной грунтовкой и окрашенная силикатной краской с добавлением 1% гидрофобизирующей добавки (система 1 — покрыта гидрофобизатором на основе метилсиликоната калия).

Примечание: Грунтовка разбавленная водой в соотношении по объему 1:1.

Толщины слоёв: выравнивающий 20 ± 2 мм, накрывочный 4 ± 1 мм, покрытие 0,1-0,2 мм.

Для сбора статистических данных каждый вид образца изготавливался в количестве 3 шт.

Испытание на паропроницаемость

Для проведения исследования изготовлены образцы 100×100 мм, твердевшие 28 суток в естественных условиях. Испытание на паропроницаемость проводилось методом «мокрой чашки» по ГОСТ 25898-2020. Для проведения исследования использовалась климатическая испытательная камера «Тепло-Влага М 0/100-80 КТВ», при поддержании в камере постоянной температуры 23°C и влажности 50% (см. Рис. 1).



Рис. 1. Проведение испытания на паропроницаемость

Испытание на поверхностное водопоглощение

Для испытаний на водопоглощение были изготовлены образцы $200 \times 200 \times 24 \pm 1$ мм, твердевшие естественных условиях 28 суток. Определение водопоглощения проводилось с применением трубок Карстена. Данный прибор в соответствии с европейскими стандартами (DIN 4117 и DIN 1048) рекомендован для определения степени водопоглощения. Регистрация объёма поглощённой воды проводилась через фиксированные интервалы времени: 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 минут и далее через каждые 60 минут. Испытание продолжается до момента достижения поглощения равного 4 мл или прекращения роста водопоглощения в течение 360 минут.

Поскольку образцы обладают разной впитывающей способностью, для удобства обработки и анализов результатов рассчитывалась средняя скорость впитывания ($10 \cdot 3 \cdot \text{мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$), на отметке времени в 30 мин по формуле:

$$S = \frac{V}{A \cdot t}$$

где S — средняя скорость впитывания ($\text{мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$); V — водопоглощение за каждый временной интервал (мл), A — площадь контакта трубы с поверхностью (8 см^2), t — время испытания (30 мин).

Водопоглощение каждого образца определялось в трех точках поверхности, поэтому для каждой серии было получено по 9 значений (см. Рис. 2).



Рис. 2. Проведение испытания на определение водопоглощения

Результаты исследования

Паропроницаемость

Средние значения паропроницаемости исследованных образцов подсистем представлены в Таблице 1 и в графическом виде отражены на Рис. 3.

Таблица 1
Результаты проведения испытаний на паропроницаемость

Система материалов	Паропроницаемость, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, для подсистемы			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Система 1	0,149	0,142	0,137	0,134
Система 2	0,149	0,142	0,134	0,131
Система 3	0,124	0,120	0,114	0,111

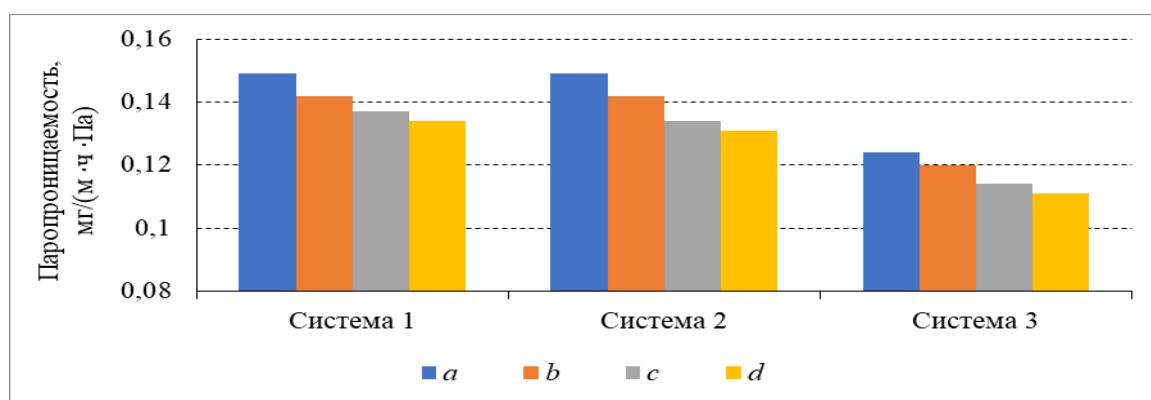


Рис. 3. Паропроницаемость образцов исследованных систем отделочных материалов

Поверхностное водопоглощение

Результаты определения скорости впитывания ($10^{-3} \cdot \text{мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$) представлены в Таблице 2 и на Рис. 4.

Таблица 2
Скорость впитывания образцов на отметке времени 30 минут

Система материалов	Скорость впитывания ($10^{-3} \cdot \text{мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$), для подсистемы			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Система 1	17,5	9,4	6,7	0
Система 2	17,5	9,4	0,6	0
Система 3	2,5	1,1	0,2	0

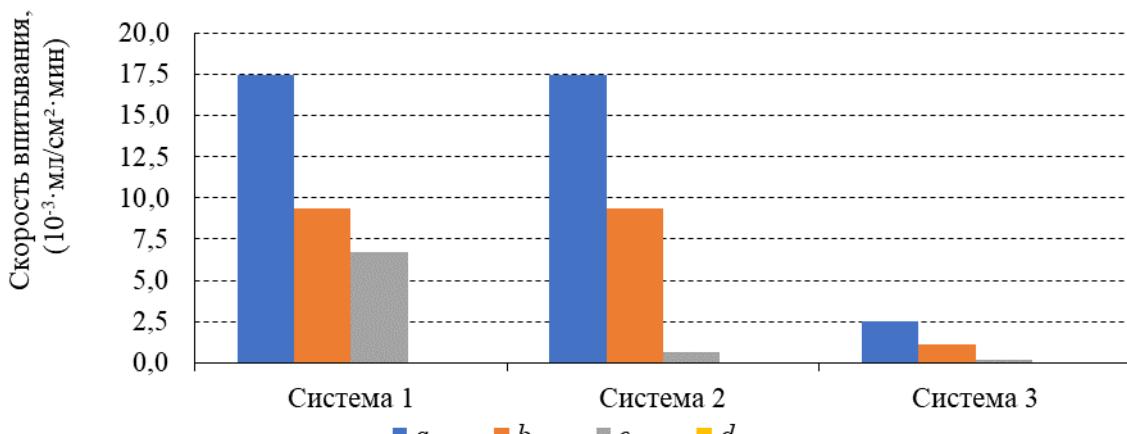


Рис. 4. Скорость впитывания образцов на отметке времени 30 минут

Система 1

Образцы подсистемы а обладают наибольшей скоростью водопоглощения поверхности, что является ожидаемым результатом в условиях отсутствия финишных покрытий. Средняя скорость впитывания на отметке времени 30 минут для них составила $17,5 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$. Впитывание 4 мл воды для данной подсистемы произошло в интервале времени от 30 до 45 минут.

У образцов подсистемы b, средняя скорость впитывания на отметке времени в 30 мин – $9,4 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, что на 54% ниже, чем у образцов подсистемы a, это говорит о том, что применение силикатной грунтовки (разведенной 1:1 с водой) положительно влияет на устойчивость к водопоглощению. Достижения предельного значения водопоглощения (4 мл) произошло в интервале времени от 90 до 180 минут.

Результаты проведения подсистемы с близки к результатам образцов подсистемы b, но в отличии от образцов подсистемы b, при проведении испытания водопоглощение по поверхности у данной подсистемы было более равномерным. Средняя скорость впитывания на отметке времени 30 мин составила $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, что не значительно меньше, чем у образцов, покрытых силикатной грунтовкой. Впитывание 4 мл воды произошло в интервале времени от 120 до 180 минут.

У образцов подсистемы d, покрытых гидрофобизатором, испытание продлилось 360 мин, а максимальное впитывание к данной отметке времени составило 0,5 мл. Средняя скорость впитывания $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ образовалась к моменту времени 240 мин.

Система 2

Результаты испытаний на водопоглощение подсистем а, б аналогичны результатам системы 1 соответствующих подсистем.

Образцы подсистемы с также показали разные результаты. Впитывание воды в образцы началось в среднем на отметках времени 15, 30 мин. На отметке времени в 30 мин образцы данной подсистемы показали среднюю скорость впитывания $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, но к отметке времени в 90 мин данный показатель возрос до $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ и наблюдался в данном значении до окончания проведения испытания.

У образцов подсистемы d к этапу времени 360 мин среднее значение поглощенной воды составляло 0,29 мл, при этом максимальное поглощение воды составило 0,5 мл. Скорость впитывания на отметке в 30 мин составляла 0 $\text{мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ и только моменту времени 240 мин данный показатель вырос до $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$

Система 3

У образцов подсистемы а, поглощение 4 мл воды было достигнуто к отметке времени 300 мин. На отметке времени 30 мин скорость впитывания равнялась $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, что соответствовало средней скоростью впитывания на всей длительности испытания.

Данные результаты говорят о том, что применение тонкодисперсных известково-пущолановых шпатлевок позволяет в значительной степени обеспечить защиту фасада от воздействия влаги, даже без применения финишного покрытия.

Все образцы подсистемы b выдержали испытание в течение 360 минут, при этом максимально поглощенное количество воды составило 3,25 мл, а минимальное значение составило 1,2 мл. На отметке времени 30 мин скорость впитывания равнялась $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$, но по достижении отметки времени в 60 мин этот показатель снизился до $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$ и удерживался в этом показателе до окончания испытания.

У образцов подсистемы с начало поглощения воды в образцы наблюдалось в промежутке времени от 30 до 90 мин. К отметке времени 360 мин максимальное поглощение составило 0,7 мл, минимальное — 0,2 мл, среднее — 0,46 мл. Скорость впитывания на отметке времени 30 мин — $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$. Данные показатели указывают на то, что тонкодисперсная известково-пущолановая шпатлевка в сочетании с силикатной краской способны защитить фасад от воздействия атмосферной влаги без применения гидрофобизаторов.

Образцы подсистемы d выдержали испытание на водопоглощение в 360 мин с средним показателем поглощения 0,29 мл, наибольшее поглощение составило 0,6 мл. Скорость впитывания на отметке времени 30 мин — $0 \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$, а изменение данного показателя до $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$ произошло на отметке времени 120 минут.

График водопоглощения образцов серии 2 в графическом виде отражен на рисунке 3. Значения средней скорости впитывания ($10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$) на промежутке времени в 30 минут представлены в табл. 2 и графически на Рис. 4.

Заключение и обсуждение

Рассмотренные системы удовлетворяют условию совместимости с кладкой по величине паропроницаемости ($0,11\text{--}0,15 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$). Во всех исследованных системах нанесение силикатной грунтовки сопровождается снижением проницаемости на 3-5%. Силикатная краска, как и известковая, дополнительно понижает паропроницаемость на 7-9%. Нанесение на известковую краску гидрофобизатора, как и использование гидрофобизирующей добавки в составе силикатной краски, незначительно уменьшает величину проницаемости (не более чем на 2%).

Водопоглощение образцов, покрытых мелкозернистой классической известковой накрывкой достигает 4 мл за 30-45 мин, тогда как применение тонкодисперсной известково-пущолановой значительно повышает водостойкость системы, снижая показатель средней скорости впитывания в 7 раз, по отношению к образцам покрытых мелкозернистой накрывкой. Применение силикатной грунтовки снижает водопоглощение ~50 %, при этом не значительно влияет на паропроницаемость, что обосновывает их обязательное применение при разработке штукатурных систем с содержанием извести. Известковая краска не оказывает значительного влияния на показатель водопоглощения, ее действие заключается лишь в распределении поглощаемой влаги по поверхности фасада. Использование силикатных красок значительно снижает водопоглощение в целом, а особенно на период до 90 минут непрерывного воздействия влаги, после 90 мин воздействия показатель скорости впитывания в среднем $1 \cdot 10^{-3} \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин}$, что с течением времени может оказывать негативное влияние на конструкцию. Применение гидрофобизаторов практически полностью исключает поверхностное водопоглощение, что свидетельствует о высокой эффективности данных составов для защиты известковой отделки фасадов от атмосферной влаги.

Таким образом, на основе интегральной оценки можно заключить, что для условий Санкт-Петербурга для отделки фасадов кирпичных зданий наиболее подходящей (по эксплуатационным качествам) из исследованных является система 2, подсистема d: известковый штукатурный грунт и накрывка, покрытая силикатной грунтовкой и окрашенная силикатной краской с добавлением 1% гидрофобизирующей добавки.

Список литературы

13. Шангина Н.Н. и др. Сравнительный анализ комплекса тепловлагофизических свойств цементного и известкового штукатурных растворов / Н.Н. Шангина, А.М. Харитонов, С.В. Корниенко, В.Я. Ольшевский, С.Н. Фомин, А.С. Горшков А.С. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 2(99). С. 67-76. DOI: 10.35211/18154360_2025_2_67.
14. Горшков Р.А., Корниенко С.В. Влияние климата и наружной штукатурки на влажностный режим каменных стен // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 971–981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981.
15. Pavia S. et. al. RILEM TC 277-LHS report: How hot are hot-lime-mixed mortars? A review. / S. Pavia, R. Veiga, J. Hughes, G. Pesce, J. Valek, J. I. Alvarez, P. Faria, A. Padovnik // Materials and Structures. 2023. V. 56. Art. number 87. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02157-1>
16. Медяник Ю.В. Классификация и анализ дефектов и повреждений штукатурных покрытий фасадов зданий // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 231-238.
17. Эмралиева С.А., Хомич В.А. Влияние морфологических особенностей пущолановых добавок на эксплуатационные свойства строительных растворов // Вестник ЮУрГУ. 2009. № 35.
18. Мажитов Е.Б. Золь-силикатная краска для отделки стен зданий : дис. ... кандид. техн. наук. Пенза. 2021. 165 с.
19. Махамбетова К.Н., Булгаков А.В. Исследование влияния современных гидрофобизирующих добавок на прочность при сжатии и водопоглощение цементно-песчаных растворов // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 6. Ч. 2
20. Шангина Н.Н. и др. / Н.Н. Шангина, А.М. Харитонов, С.В. Корниенко, В.Я. Ольшевский, А.И. Еникеев, С.Н. Фомин, А.С. Горшков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 1(98). С. 407-417. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_407.
21. Хабибулина А.Г., Сулейманов А.М., Бабенко Р.Н. Фасады исторических зданий с каменной кладкой: обзор методов и способов реставрации // Известия КГАСУ. 2023. № 4(66). С. 96-108. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_96, EDN: HKFLOE
22. Галунин А.А., Гапеев А.А., Поспичал В. Оценка зависимости динамических модулей упругости от пористости образцов известняка методом импульсной диагностики // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № (4-1). Сс. 98-107. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98
23. Malathy R. et al. Lime based concrete and mortar enhanced with pozzolanic materials – State of art / R. Malathy, R. Shanmugam, D. Dhamotharan, D. Kamaraj, M. Prabakaran, J. Kim // Construction and Building Materials. 2023. Volume 390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131415
24. Loganina V.I., Davydov O.A., Grintsova O.V. Lime finishing recipes for restoration of buildings and structures // International Journal of Civil Engineering. 2014. Vol. 3. Issue 1. Pp. 95-98.
25. Зайцева М.В. Обеспечение качества известковых составов для отделки и реставрации стен зданий : дис. ... кандид. техн. наук. Пенза, 2023. 174 с.
26. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Причины и механизмы повреждения штукатурного покрытия фасадов исторических каменных зданий // Социология города. 2023. № 2. С. 59-77. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_59.

References

1. Shangina N.N., Kharitonov A.M., Kornienko S.V., Olshevsky V.Ya., Fomin S.N., Gorshkov A.S. Comparative analysis of thermal and moisture-physical properties of cement and lime plaster mortars // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series:

- Construction and Architecture. 2025. No. 2(99). P. 67-76. DOI: 10.35211/18154360_2025_2_67.
- 2. Gorshkov R.A., Kornienko S.V. Influence of climate and external plaster on the moisture regime of stone walls // Bulletin of MGSU. 2024. Vol. 19. Issue 6. P. 971–981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981.
 - 3. S. Pavia, R. Veiga, J. Hughes, G. Pesce, J. Valek, J. I. Alvarez, P. Faria, A. Padovnik. How hot are hot-lime-mixed mortars? A review // Materials and Structures (2023) 56:87. DOI: 10.1617/s11527-023-02157-1(0123456789()..-volV)(01234567
 - 4. Medyanik Yu.V. Classification and analysis of defects and damage to plaster coatings of building facades // Proceedings of KGASU, 2018, No. 2(44) P. 231-238.
 - 5. Emralieva S.A., Khomich V.A. Influence of morphological features of pozzolanic additives on operational properties of construction mortars // Bulletin of SUSU, No. 35, 2009
 - 6. Mazhitov E.B. Sol-silicate paint for wall finishing of buildings: dissertation for candidate of technical sciences. Penza, 2021, 165 p.
 - 7. Makhambetova K.N., Bulgakov A.V. Study of the influence of modern hydrophobic additives on compressive strength and water absorption of cement-sand mortars // Modern Scientific Research and Innovations. 2015. No. 6. Part 2
 - 8. Shangina N.N., Kharitonov A.M., Kornienko S.V., Olshevsky V.Ya., Enikeev A.I., Fomin S.N., Gorshkov A.S. Influence of external plaster coating type on temperature-humidity characteristics of homogeneous stone walls // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2025. No. 1(98). P. 407-417. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_407.
 - 9. Khabibulina A.G., Suleimanov A.M., Babenko R.N. Facades of historical buildings with stone masonry: review of restoration methods and techniques // Proceedings of KGASU, 2023, No. 4(66), p. 96-108, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_96, EDN: HKFLOE
 - 10. Galunin A.A., Gapeev A.A., Pospichal V. Assessment of the dependence of dynamic elastic moduli on porosity of limestone samples using pulse diagnostics method // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021. I. 4-1. Pp. 98–107 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98
 - 11. Malathy R. et al. Lime based concrete and mortar enhanced with pozzolanic materials – State of art / R. Malathy, R. Shanmugam, D. Dhamotharan, D. Kamaraj, M. Prabakaran, J. Kim // Construction and Building Materials. 2023. Volume 390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131415
 - 12. Loganina V.I., Davydov O.A., Grintsova O.V. Lime finishing recipes for restoration of buildings and structures // International Journal of Civil Engineering. 2014. Vol. 3, I. 1. Pp. 95-98.
 - 13. Zaitseva M.V. Ensuring quality of lime compositions for finishing and restoration of building walls: dissertation for candidate of technical sciences. Penza, 2023, 174 p.
 - 14. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Shangina N.N., Kharitonov A.M. Causes and mechanisms of plaster coating damage on facades of historical stone buildings // Urban Sociology. 2023. No. 2. P. 59-77. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_59.

Преимущества утилизации торфяной золы при производстве строительной керамики

УДК 691.421

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0018>

Номер статьи: C0018

Сахарова Антонина Сергеевна

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, доцент кафедры «Инженерная химия и естествознание»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9047-0013

asakharova@pgups.ru

Спрыжкова Юлия Игоревна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, магистрант кафедры «Инженерная химия и естествознание»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3821-4960

yuliaspryzhkova@yandex.ru

Рожкова Инна Евгеньевна

ООО «ПИНДСТРУП», инженер-эколог

Луга, Россия

eip@pindstrup.ru

Статья получена: 01.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Исследованы возможности утилизации золы, образующейся при сжигании торфа в котельных установках, и обосновано её применение в качестве вторичного техногенного сырья при производстве строительных керамических материалов. Рассмотреть химико-минералогический состав торфяной золы, определить её влияние на физико-механические свойства керамических изделий и оценить потенциал использования данного отхода для снижения экологической нагрузки на окружающую среду и реализации принципов циркулярной экономики. Проведён анализ химического состава золы, полученной на предприятии ООО «ПИНДСТРУП», с определением содержания оксидов кремния, алюминия, кальция, железа и других элементов. Использованы сравнительно-аналитические методы, включающие обзор научных источников и сопоставление полученных данных с известными результатами исследований в области переработки промышленных и агропромышленных отходов. Установлено, что зола торфяного происхождения характеризуется высоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3 , что обеспечивает её пригодность для использования в составе керамической шихты. Добавление 10–20 % золы способствует снижению температуры спекания, повышению прочности и теплоизоляционных свойств изделий, а также уменьшению их массы. Показана экологическая безопасность материала вследствие низкого содержания тяжёлых металлов. Применение торфяной золы в производстве строительной керамики позволяет снизить себестоимость продукции, уменьшить нагрузку на природные ресурсы и повысить экологическую эффективность строительной индустрии. Полученные результаты подтверждают перспективность вовлечения золы от сжигания торфа в циркулярные производственные циклы, что соответствует принципам устойчивого развития и

ресурсосбережения и внедрения инновационных экологически безопасных технологий в строительное производство.

Ключевые слова: зола от сжигания торфа, вторичное сырьё, строительные материалы, керамика, химический состав, утилизация отходов.

Advantages of recycling peat ash in the production of building ceramics

Sakharova Antonina Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Department of Engineering Chemistry and Natural Science, Associate Professor

St. Petersburg, Russian Federation

asakharova@pgups.ru

Spryzhkova Yulia Igorevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Department of Engineering Chemistry and Natural Science, Master's student

St. Petersburg, Russian Federation

yuliaspryzhkova@yandex.ru

Rozhkova Inna Evgenievna

PINDSTRUP LLC,

Environmental engineer

Luga city, Russian Federation

eip@pindstrup.ru

Abstract. The possibilities of ash recycling from peat combustion in boiler plants have been studied. Its use as a secondary technogenic raw material in the production of construction ceramic materials is justified. Consider the chemical-mineralogical composition of peat ash, determine its influence on the physical and mechanical properties of ceramic products and evaluate the potential of using this deviation to reduce environmental impact on the environment and implement principles of circular economy. Methods: A chemical analysis of the ash obtained at «PINDSTRUP» company was carried out, determining the content of oxides of silicon, aluminium, calcium, iron and other elements. Comparative analytical methods are used, including a review of scientific sources and comparison of the data obtained with known research results in the field of industrial and agro-industrial waste treatment. Results: It was found that peat ash is characterized by high content of SiO_2 and Al_2O_3 , which provides its suitability for use in the composition of ceramic pulp. The addition of 10-20% ash contributes to lower sintering temperature, increased strength and heat insulation properties of products, as well as reducing their mass. The material is shown to be environmentally safe due to low content of heavy metals. Practical relevance: The use of peat ash in the production of building ceramics reduces the cost of production, reduces the burden on natural resources and increases the environmental efficiency of the construction industry. The results confirm the promise of inclusion of ash from burning peat in circular production cycles, which is consistent with the principles of sustainable development and resource conservation and the introduction of innovative environmentally friendly technologies into construction production.

Keywords: peat combustion ash, secondary raw material, building materials, ceramics, chemical composition, waste utilization.

Введение

Современные тенденции в области охраны окружающей среды и рационального природопользования диктуют необходимость пересмотра подходов к утилизации твёрдых минеральных и техногенных отходов. Существенные объёмы зольных остатков, образующихся при сжигании органогенного топлива, включая торф, остаются практически не востребованными в промышленности, несмотря на их потенциальную ценность. В последние годы особое внимание уделяется переходу к циркулярной (замкнутой) модели экономики, в рамках которой отходы рассматриваются не как конечный продукт производственного цикла, а как потенциальный источник вторичных ресурсов. Подобный подход позволяет сократить потребление природного сырья, уменьшить углеродный след производства и снизить нагрузку на экосистемы. В этой связи исследование состава и технологических свойств золы торфяного происхождения становится актуальной задачей как для строительной отрасли, так и для сферы экологического менеджмента. Зола, образующаяся при сжигании торфа, представляет собой многокомпонентную систему, включающую минеральные фазы различной природы, что предопределяет её потенциал для использования в качестве вторичного минерального сырья. При этом степень её пригодности определяется не только химическим составом, но и физико-химическими свойствами, такими как удельная поверхность, дисперсность и активность в процессах спекания.

Торфяная зола, в силу своего химического состава, близка к ряду традиционных минеральных материалов, используемых в строительной керамике. При этом мировая практика демонстрирует успешные примеры вовлечения различных видов зол и шламов в производство строительных изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В условиях истощения природных ресурсов и экологических ограничений особенно важным становится использование местных, дешёвых и малоценных отходов, способных заменить дорогостоящие природные аналоги.

Настоящая работа посвящена исследованию химических свойств золы, образующейся в результате сжигания торфа, и оценке её пригодности в качестве вторичного сырья в керамическом производстве.

Дополнительный интерес представляет оценка влияния условий сжигания торфа на характеристики получаемой золы. Известно, что температура горения, наличие избытка кислорода и состав исходного топлива напрямую определяют фазовый состав зольного остатка. Например, повышение температуры сжигания способствует образованию более устойчивых оксидных фаз и частичному спеканию частиц золы, что снижает её реакционную способность. В то же время при умеренных температурах (до 900 °C) зола сохраняет высокую удельную поверхность и повышенную химическую активность, что делает её более перспективной для керамического производства.

В современных условиях проблема утилизации твёрдых минеральных отходов приобретает всё большую актуальность в связи с ростом объёмов их образования при добыче и переработке минеральных ресурсов. Увеличение масштабов производства и потребления минерального сырья сопровождается нарастанием экологических и экономических последствий, связанных с образованием значительных объёмов отходов, включая горные породы, шламы, хвосты и иные материалы. Отсутствие эффективных технологий их переработки может способствовать загрязнению окружающей среды и представлять угрозу здоровью населения.

Методы утилизации минеральных отходов

На сегодняшний день одной из ключевых задач в области охраны окружающей среды и рационального природопользования является разработка и внедрение эффективных методов утилизации минеральных отходов. Традиционные способы, в частности захоронение на полигонах, не только требуют значительных территориальных ресурсов, но и сопряжены с рисками вторичного загрязнения почвы и водных объектов. В качестве

альтернативы рассматривается возможность повторного использования указанных отходов в строительной отрасли, включая производство строительных и отделочных материалов.

По данным Европейской ассоциации по утилизации золы (ЕСОВА), в странах ЕС более 70 % зол и золошлаковых отходов энергетических предприятий повторно вовлекаются в хозяйственный оборот, в том числе в производстве цемента, бетона и керамических изделий. В России этот показатель не превышает 10–12 %, что объясняется недостаточной нормативной базой и ограниченной технологической отработанностью методов переработки. Введение в промышленную практику вторичных минеральных ресурсов, таких как торфяная зора, позволяет не только минимизировать объемы отходов, но и обеспечить импортонезависимость отечественного производства строительных материалов.

Перспективным направлением является создание высокоэффективных композитных материалов, получаемых по экологически чистым технологиям с использованием дешёвого, массово доступного и зачастую не востребованного в иных сферах сырья как природного, так и техногенного происхождения. Разработка таких материалов соответствует современным концепциям устойчивого развития, замкнутого производственного цикла и ресурсосбережения [1]. Научный интерес вызывает также возможность целенаправленного регулирования фазового состава золы с помощью добавок, влияющих на образование активных алюмосиликатных комплексов при обжиге.

Одним из наиболее разработанных и практически значимых направлений утилизации техногенных отходов является получение керамических строительных материалов. Экономическая эффективность производства изделий из вторичного сырья обусловлена, в частности, предотвращённым экологическим ущербом и более низкой себестоимостью сырья по сравнению с природными аналогами — в среднем в 2–3 раза [2].

Помимо экономического эффекта, применение золы способствует улучшению ряда эксплуатационных характеристик керамических изделий. Введение зольных компонентов повышает пористость массы, что снижает теплопроводность и улучшает звукоизоляционные свойства материала. Одновременно зора может выступать как флюс, ускоряющий процессы спекания и обеспечивающий равномерное распределение жидкой фазы при обжиге.

В контексте современных климатических вызовов использование золы как вторичного сырья может рассматриваться также как элемент декарбонизационной стратегии строительной отрасли. Сокращение доли природного глинистого сырья ведёт к уменьшению объёмов горных разработок и, соответственно, снижению углеродного следа. Таким образом, технологическая интеграция зольных компонентов в производство строительных материалов решает сразу несколько задач: утилизацию отходов, экономию природных ресурсов и уменьшение выбросов CO₂.

Значительный интерес представляют исследования, направленные на комплексное использование золы вместе с другими техногенными продуктами — например, с отходами стекольного, цементного и металлургического производств. Совместное применение различных минеральных добавок позволяет достичь синергетического эффекта, выражющегося в повышении прочности и плотности керамических изделий, снижении их водопоглощения и увеличении морозостойкости.

Торфяная зора, в отличие от золы угольного происхождения, характеризуется более низким содержанием тяжёлых металлов, что делает её экологически безопасной для применения в строительных материалах. Кроме того, наличие фосфора и кальция открывает возможность использования золы не только в строительстве, но и в сельском хозяйстве в качестве минеральной добавки в удобрения.

Особое внимание заслуживает вопрос стандартизации и сертификации золы как вторичного ресурса. Для промышленного применения требуется разработка технических условий, включающих классификацию по химическому составу, степени дисперсности и содержанию вредных примесей. Это позволит обеспечить стабильность качества продукции и снизить технологические риски при масштабном внедрении.

С учётом текущих тенденций можно прогнозировать, что в ближайшие годы доля использования золы и золошлаков в строительных материалах будет расти, особенно в

регионах с развитой энергетикой на органогенном топливе. Развитие данного направления требует координации усилий научных центров, промышленных предприятий и органов государственной власти для формирования единой стратегии обращения с золошлаковыми отходами.

По данным В.Ф. Павлова, объём производства нерудных строительных материалов с использованием отходов в Великобритании и Германии составляет порядка 30 млн тонн в год, тогда как в России этот показатель не превышает 100 тыс. тонн [3]. Это свидетельствует о наличии значительного потенциала для расширения применения вторичных ресурсов в отечественном строительном комплексе.

Широкое распространение получили исследования, направленные на использование органических отходов агропромышленного комплекса для получения строительной керамики. Среди них можно выделить рисовую шелуху, отходы хлопкоочистки, жмыж оливкового масла, пшеничную солому, дроблённые косточки и другие. В России объём агропромышленных отходов составляет порядка 770 млн тонн в год, из которых около 14,6 млн тонн приходятся на растительные компоненты. По состоянию на 2024 год наблюдается рост объёмов органических отходов на 8,7 % по сравнению с 2023 годом. В странах с развитым сельским хозяйством, таких как Испания, Франция и Чили, такие виды отходов активно вовлекаются в процесс производства строительных керамических материалов.

Значительный вклад в развитие данного направления вносят испанские исследователи, изучающие возможность применения отходов производства оливкового масла [4, 5]. Так, использование жмыжа в качестве порообразующей добавки при производстве кирпича позволяет снизить его объёмную плотность и теплопроводность при сохранении достаточных прочностных характеристик.

Аналогично перспективным является использование шламов целлюлозно-бумажной промышленности. В ряде технологических решений доля шлама может достигать 20–40 % в сухом веществе. В работе [6] представлены данные об использовании смеси красной глины, бумажного шлама и стеклобоя. Полученные при температуре обжига 1050–1100 °C керамические образцы продемонстрировали более высокие физико-механические характеристики по сравнению с образцами, содержащими только глину.

Истощение природной сырьевой базы в производстве керамики обуславливает необходимость вовлечения в технологический процесс зол и золошлаковых отходов. Состав и свойства зол зависят от вида топлива, параметров его сжигания и условий хранения отходов. Потенциал для использования в строительной отрасли представляют отходы, получаемые при эксплуатации тепловых электростанций, котельных, мусоросжигательных установок и других объектов энергетической инфраструктуры.

Отдельный интерес представляет зола, образующаяся при сжигании торфа. По данным на 2020 год, в России функционировали отдельные крупные энергетические объекты, использующие торф в качестве топлива, включая Кировскую ТЭЦ-4 (Кировская область) и Шарьинскую ТЭЦ (Костромская область). На 2024 год сохраняется эксплуатация торфяных котельных в ряде регионов, что создаёт предпосылки для изучения возможности переработки золы торфяного происхождения в строительной индустрии.

Кроме того, научные коллективы Республики Беларусь продемонстрировали успешные результаты использования древесной золы в качестве добавки при производстве керамических изделий с улучшенными теплоизоляционными характеристиками, что подтверждает обоснованность интеграции различных видов зол в керамические массы.

Учитывая позитивные результаты, полученные при применении древесной золы в технологии керамики, представляет интерес расширение спектра используемых зольных материалов за счёт отходов от сжигания других видов органогенного топлива, в частности торфа. Зола от сжигания торфа, обладая сопоставимыми физико-химическими свойствами, может рассматриваться как альтернативный кремнеглиноземистый компонент, способный обеспечить аналогичный или даже более высокий технико-экономический эффект. В этом контексте становится особенно актуальным изучение её химического состава, что позволит оценить возможности эффективного и экологически обоснованного включения данного техногенного продукта в производственные циклы.

Торф, представляющий собой низкокалорийное топливо органогенного происхождения, характеризуется высокой гетерогенностью компонентного состава, включающего органические соединения, минеральные фракции и биогенные включения. В процессе сжигания торфа образуется зольный остаток – зола от сжигания торфа, обладающая сложным и переменным минеральным составом, определяющим её потенциальную ценность в различных отраслях промышленности.

Комплексный анализ химических характеристик золы позволяет оценить возможности её вторичного использования, в частности, в строительной, керамической и агрохимической отраслях. Таким образом, исследование золы от сжигания торфа имеет как фундаментальное, так и прикладное значение, содействуя реализации принципов устойчивого развития и циркулярной экономики.

Анализ химико-минералогического состава золы от сжигания торфа

Частью настоящей работы является изучение химического состава торфа и продуктов его термического разложения. В соответствии с литературными источниками, торф в среднем содержит углерод (50–60%), кислород (30–40%), водород (5–6,5%), азот (1–3%) и серу (0,1–2,5%) [7]. Для торфа характерна высокая влажность, достигающая в природном состоянии 88–96% по массе. В целях получения абсолютно сухого остатка, торф подвергается сушке при температуре 105 °C, в результате чего разделяется на органическую и минеральную фракции; последняя сохраняется в виде золы после сжигания [8].

Зола, остающаяся после сжигания торфа, преимущественно состоит из оксидов кальция, кремния, железа, фосфора, калия и других элементов. Содержание химических элементов в торфяной золе варьируется в широких пределах и зависит от режимов и условий торфообразования.

Химический состав золы, образующейся в котельных установках, был исследован на примере продукции предприятия ООО «ПИНДСТРУП». Полученный образец представляет собой сухой, сыпучий порошок тёмно-серого цвета, характеризующийся выраженной щелочной реакцией среды и низким содержанием тяжёлых металлов: кадмий Cd менее 0,5 мг/кг, свинец Pb 19 мг/кг, ртуть Hg менее 0,001 мг/кг, никель Ni менее 4, мг/кг, медь Cu 12,3 мг/кг, цинк Zn 17,8 мг/кг, кобальт Co менее 0,02 мг/кг (Табл.1).

Таблица 1
Химический состав золы от сжигания торфа (ООО «ПИНДСТРУП»)

Наименование компонента	Содержание, %
Вода	2,90
Органическое вещество	28,10
Магния оксид	1,35
Кальция оксид (CaO)	11,60
Натрия оксид (Na2O)	0,17
Калия оксид (K2O)	0,32
Сера в перерасчете на оксид серы (SO3)	4,00
Фосфор в перерасчете на оксид фосфора (P2O5)	0,86
Алюминия оксид (Al2O3)	15,50
Кремния оксид (SiO2)	24,6
Железа оксид	5,50
Неидентифицируемый остаток	4,2724

Кремний в составе золы представлен преимущественно в виде диоксида кремния (SiO_2). Его повышенное содержание характерно для низинных торфов, в которых оно связано с наличием песчано-глинистых включений. Также с точки зрения микроструктуры, присутствие в золе активных кремнезёмсодержащих фаз способствует формированию муллитовой структуры, обеспечивающей высокую термостойкость и устойчивость к многократным циклам замораживания–оттаивания. Кальций, как правило, присутствует в форме CaO , и его концентрация определяется влиянием грунтовых вод, особенно в областях выхода водоносных горизонтов.

Алюминий представлен в виде Al_2O_3 , концентрация которого варьирует от 0,2–0,3% в верховых и переходных торфах до 0,5% в низинных. Содержание фосфора (P_2O_5) не зависит от типа торфа и стабильно составляет десятые доли процента. Магний (MgO) в составе торфа колеблется от 0,1% до 0,3% в зависимости от типа месторождения и зольности.

Перспективы применения торфяной золы в составе керамической шихты при производстве кирпича

Одним из перспективных направлений утилизации золы является её применение в составе керамической шихты при производстве кирпича. Минералогический состав золы, обогащённый кремнезёмом и алюмосиликатами, позволяет использовать её в качестве дополнительного кремнеглиноземистого компонента. В процессе обжига при температурах 900–1050 °C зола способствует формированию жидкофазного спекания, снижая температуру обжига и улучшая микроструктуру готовых изделий.

Добавление 10–20% золы к глиняному сырью приводит к увеличению прочности на сжатие керамического кирпича на 15–20% и снижению его водопоглощения, одновременно уменьшая массу изделий и, соответственно, нагрузку на строительные конструкции.

Химический состав золы с высоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3 способствует формированию муллитовой фазы, что значительно повышает термостойкость и морозостойкость керамических изделий [9, 10]. Наличие пористой структуры золы обеспечивает равномерное распределение микропор, способствующих улучшению теплоизоляционных характеристик. Однако повышенное содержание щелочных оксидов (K_2O , Na_2O) может вызывать образование эфлоресценций, что требует предварительного контроля и корректировки шихты.

Таким образом, проведённый комплексный анализ химического состава золы от сжигания торфа подтверждает её значительный потенциал в качестве вторичного сырьевого ресурса. Обогащённость золы кремнезёмом, алюмосиликатами, оксидами кальция и железа открывает широкие перспективы её применения в строительной отрасли [11–13] — от керамического кирпича и бетонов до активных минеральных добавок в цементных композициях [14–17]. Кроме того, её использование возможно в агротехнических и экологических технологиях.

Выводы

Проведённый анализ показал, что зола от сжигания торфа обладает значительным потенциалом в качестве вторичного сырья в строительной отрасли. Высокое содержание диоксида кремния, оксида алюминия и других ценных компонентов позволяет использовать её в составе керамической шихты для производства строительных материалов с улучшенными физико-механическими и теплоизоляционными свойствами. Результаты подтверждают возможность замещения части традиционного сырья на зольный остаток, что снижает себестоимость производства и способствует реализации принципов циркулярной экономики. Одновременно с этим подчеркивается необходимость дальнейших исследований, направленных на детальное изучение фазового состава, поведения золы в условиях термической обработки и её взаимодействия с компонентами глинистого сырья. Рациональное включение золы от сжигания торфа в промышленные технологии

представляется перспективным направлением устойчивого развития, направленного на минимизацию экологических рисков и ресурсосбережение.

В перспективе требуется проведение дополнительных исследований, направленных на изучение влияния параметров обжига на фазовое превращение золы, оптимизацию рецептурных соотношений и разработку нормативных требований к качеству золошлаковых компонентов. Также целесообразно рассмотреть возможность использования золы торфяного происхождения не только в керамическом производстве, но и в составе цементных композитов и теплоизоляционных смесей. Это позволит создать целостную систему переработки отходов энергетики в строительных материалах, обеспечив тем самым переход к замкнутым циклам производства и повышению экологической устойчивости регионов.

Список литературы

1. Кожухова Н. И., Клашникова В. А., Жерновский И. В. Экологический аспект утилизации минеральных отходов промышленности в строительной отрасли // Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов. Сборник докладов III Международной молодежной научной конференции. Том Часть 1. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С 218-219. EDN: <https://elibrary.ru/VQVFCJ>
2. Столбоушкин А. Ю. Стеновые керамические материалы матричной структуры на основе неспекающегося малопластичного техногенного и природного сырья. Дисс. докт. техн. наук. Новосибирск. 2014. 365 с. EDN: <https://elibrary.ru/RHGTE>
3. Павлов В. Ф. Способ вовлечения в производство строительных материалов промышленных отходов // Строительные материалы. 2003. № 8. С. 28–30. EDN: <https://elibrary.ru/IBEJXT>
4. La Rubia-Garcia M. D., Yebra-Rodríguez Á., Eliche-Quesada D., Corpas-Iglesias F. A., López-Galindo A. Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production // Construction and Building Materials. 2012. V. 36. P. 395–500. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.06.009>
5. de la Casa J.A., Castro E. Recycling of washed olive pomace ash for fired clay brick manufacturing // Construction and Building Materials. 2014. V. 61. P. 320–326. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01279-x>
6. Mymrin V. et. al. Red clay application in the utilization of paper production sludge and scrap glass to fabricate ceramic materials / V. Mymrin, W. Klitzke, K. Alekseev, R. E. Catai, A. Nagalli, R. L. dos SantosIzzo, C. A. Romano // Applied Clay Science. 2015. V. 107. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.031>
7. Тюремнов С. Н. Химический состав торфа // Торфяные месторождения, 1976. URL: <https://www.activestudy.info/ximicheskij-sostav-torfa/> Зооинженерный факультет МСХА. (Дата обращения 20.04.2025 г.).
8. Лиштван И. И. Коллоидная химия и физико-химическая механика торфа: история развития и современные направления исследований // Природопользование. 2012. № 22. С. 47-56. EDN: <https://elibrary.ru/CPKSCN>
9. Куликов А. Н., Смирнова Т. В. Химия торфа. СПб.: Недра, 2018.
10. Карташёв С. А. Зольность и термохимия торфяных топлив. Москва: Энергия, 2019.
11. Соловьева В.Я., Козин П.А., Степанова И.В., Смирнова Т.В. Высокопрочные бетоны повышенной долговечности, модифицированные нанополимерной добавкой // Естественные и технические науки. 2014. № 2 (70). С. 296-298. EDN: <https://elibrary.ru/SBHZXP>
12. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D., Yorshikov N. Increasing the level of properties of composite materials for civil engineering geoconstruction with the use of new generation additives // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 50. 2020. Springer, Singapore. С. 387-393. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_40

13. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. C. 339-345. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35
14. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D., Kasatkina A. A high-performance repair mixture to restore and protect damaged concrete structures. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 50. 2020. Springer, Singapore. C. 369-375. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_38
15. Temnev V., Abu-Khasan M., Charnik D., Kuprava L., Egorov V. The mesh of shells of a bionic type to be operated in extreme habitats. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. C. 022023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022023>
16. Абу-Хасан М. С., Егоров В. В., Куправа Л. Р. Соединения деревянных конструкций на основе композитных материалов // БСТ: Бюллентень строительной техники. 2018. № 12 (1012). С. 46-47. EDN: <https://elibrary.ru/vnbpxq>
17. Егоров В. В., Абу-Хасан М. С., Розанцева Н. В., Куправа Л. Р. Несущие деревометаллические конструкции ферм покрытия большепролетных железнодорожных депо // БСТ: Бюллентень строительной техники. 2018. № 8 (1008). С. 37-38. EDN: <https://elibrary.ru/xwpwpi>

References

1. Kozhukhova N. I., Klasnikova V. A., Zernovsky I. V. Environmental Aspects of Mineral Waste Utilization in the Construction Industry // Ecology and Sustainable Natural Resource Management in Agro-Industrial Regions. Proceedings of the III International Youth Scientific Conference. Volume 1. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2015. Pp. 218-219. EDN: <https://elibrary.ru/VQVFCJ>
2. Stolboushkin A. Y. Wall ceramic materials of matrix structure based on non-spreading low-plastic man-made and natural raw materials. Diss. doct. Technical sciences. Novosibirsk. - 2014. – 365 p. EDN: <https://elibrary.ru/RHGTE>
3. Pavlov V. F. A method for incorporating industrial waste into the production of building materials // Construction Materials. – 2003. – No. 8. – Pp. 28-30. EDN: <https://elibrary.ru/IBEJXT>
4. La Rubia-García M. D., Yebra-Rodríguez Á., Eliche-Quesada D., Corpas-Iglesias F. A., López-Galindo A. Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production // Construction and Building Materials. – 2012. – V. 36. – Pp. 395–500. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.06.009>
5. de la Casa J.A., Castro E. Recycling of washed olive pomace ash forfired clay brick manufacturing // Construction and Building Materials. – 2014. – V. 61. – Pp. 320–326. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01279-x>
6. Mymrin V., Klitzke W., Alekseev K., Catai R. E., Nagalli A., dos SantosIzzo R. L., Romano C. A. Red clay application in the utilization of paper production sludge and scrap glass to fabricate ceramic materials // Applied Clay Science. – 2015. – V. 107. – P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.031>
7. Tyuremnov S. N. Chemical composition of peat // Peat deposits, 1976. URL: <https://www.activestudy.info/ximicheskij-sostav-torfa/> Zooengineering faculty of Moscow Agricultural Academy.
8. Lishtvan I. I. Colloid Chemistry and Physical and Chemical Mechanics of Peat: History of Development and Current Research Directions // Nature Management. 2012. No. 22. Pp. 47-56. EDN: <https://elibrary.ru/CPKSCN>
9. Kulikov A. N., Smirnova T. V. Peat Chemistry. — St. Petersburg: Nedra, 2018.
10. Kartashev S. A. Ash content and thermochemistry of peat fuels. — Moscow: Energiya, 2019.

11. Solovyova V.Ya., Kozin P.A., Stepanova I.V., Smirnova T.V. High-Strength Concretes of Increased Durability Modified with a Nanopolymer Additive // Natural and Technical Sciences. 2014. No. 2 (70). Pp. 296-298. EDN: <https://elibrary.ru/SBHZXP>
12. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D., Yorshikov N. Increasing the level of properties of composite materials for civil engineering geoconstruction with the use of new generation additives // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 50. 2020. Springer, Singapore. Pp. 387-393. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_40
13. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D., Kasatkina A. A high-performance repair mixture to restore and protect damaged concrete structures. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 50. 2020. Springer, Singapore. 339-345. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35
14. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D., Kasatkina A. A high-performance repair mixture to restore and protect damaged concrete structures. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. 369-375. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_38
15. Temnev V., Abu-Khasan M., Charnik D., Kuprava L., Egorov V. The mesh of shells of a bionic type to be operated in extreme habitats. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. 022023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022023>
16. Abu-Hasan M. S., Egorov V. V., Kuprava L. R. Connections of wooden structures based on composite materials // BST: Bulletin of Construction Technology. 2018. No. 12 (1012). Pp. 46-47. EDN: <https://elibrary.ru/vnbpxq>
17. Egorov V. V., Abu-Khasan M. S., Rozantseva N. V., Kuprava L. R. Load-bearing wood-and-metal structures of the roof trusses of large-span railway depots // BST: Bulletin of Construction Technology. 2018. No. 8 (1008). Pp. 37-38. EDN: <https://elibrary.ru/xwpwpj>

Использование пенобетона в конструкции укороченного улавливающего тупика

УДК 625.144.1

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0019>

Номер статьи: C0019

Селезnev Алексей Викторович

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
кафедра «Железнодорожный путь», доцент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3320-5735

seleznev_alexei@mail.ru

Романов Андрей Валерьевич

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 6385-3293

andrey.romanov@mail.ru

Статья получена: 03.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Предложено конструктивное решение улавливающего тупика с покрытием из пенобетона, обладающего набором необходимых свойств, обеспечивающих с одной стороны надёжную остановку подвижного состава, с другой стороны – значительное сокращение длины тупика. В отличии от засыпки рельсов песком, которая теряет свои рабочие свойства при замерзании, предложенная конструкция сохраняет свою работоспособность в любую погоду. Дано описание конструкции покрытия из пенобетона и технологии его эксплуатации. Наиболее перспективные области применения предложенной конструкции улавливающего тупика – участки с затяжными уклонами, на которых внедряется обращение поездов повышенной массы.

Ключевые слова: безопасность движения, затяжной спуск, улавливающий тупик, сопротивление движению поезда.

Using foam concrete in the design of a shortened railway capture dead end

Seleznev Alexey Viktorovich

Candidate of Technical Sciences,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Department «Railway Track», associate professor

St. Petersburg, Russia

seleznev_alexei@mail.ru

Romanov Andrey Valerievich

Candidate of Technical Sciences, associate professor,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Head of the Department «Railway Track»

St. Petersburg, Russia

andrey.romanov@mail.ru

Abstract. A constructive solution of a railway capture dead end with a foam concrete coating is proposed, which has a set of necessary properties that ensure, on the one hand, a reliable stop of the rolling stock, and, on the other hand, a significant reduction in the length of the deadlock. Unlike the sand filling of the rails, which loses its working properties when it freezes, the proposed design remains functional in any weather. The article provides a description of the foam concrete coating design and its operating technology. The most promising areas for using the proposed design railway capture dead end are sections with long slopes where heavy trains are being operated.

Keywords: traffic safety, long descent, railway capture dead end, resistance to train movement.

Введение

Проектирование, строительство и эксплуатация объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта Российской Федерации должны обеспечивать требования безопасности, установленные техническими регламентами и документами по стандартизации. Требования безопасности устанавливаются с учётом обеспечения требуемого уровня риска причинения вреда, то есть направлены как на предотвращение отказов, в том числе аварий на железнодорожном транспорте, так и на снижение тяжести их последствий [1-2].

Техническим регламентом о безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта установлено требование к участкам железнодорожного пути с затяжными спусками о необходимости иметь улавливающие тупики для остановки потерявшего управление при движении по этому спуску поезда или части поезда. Такие тупики предусматриваются при новом строительстве и реконструкции железнодорожных линий, чтобы исключить попадание неуправляемого подвижного состава на станцию [3-5].

Выбор места для устройства улавливающего тупика, его длина, план и профиль зависят от рельефа местности и кинетической энергии поезда, которую требуется погасить. Размещение на местности и проектирование таких тупиков, как правило, вызывает значительные трудности у разработчика проектной документации, связанные с тем, что с одной стороны их требуется разместить в стеснённых условиях горной, холмистой или сильно пересечённой местности, а с другой стороны – обеспечить требуемые параметры плана и продольного профиля, чтобы безопасно остановить потерявший управление грузовой состав. Данная проблема усугубляется на участках тяжеловесного движения, где увеличиваются веса и длины поездов (более 6000 т или 71 условный вагон) и требуется реконструкция улавливающих тупиков на затяжных спусках с увеличением их длины с нормативными значениями уклонов.

Например, проектными решениями строительства новой железнодорожной линии Кызыл – Курагино на одном из перегонов, имеющем затяжной спуск, предусмотрен улавливающий тупик длиной 800 метров с элементами продольного профиля крутизной до 100 %.

Другим примером может служить создание железнодорожной инфраструктуры на западном берегу Кольского залива, где на перегоне, имеющем затяжной спуск, предусмотрен улавливающий тупик длиной 1500 метров, а его фактическая высота (сумма преодолеваемых высот) составляет более 40 м.

Таким образом выполнение требований безопасности движения поездов на рассматриваемых участках требует как значительных дополнительных капитальных вложений, определяемых стоимостью строительства улавливающих тупиков, так и дополнительных эксплуатационных расходов, связанных с их текущим содержанием и обслуживанием.

При этом, улавливающие тупики не допускается занимать подвижным составом при маневровой работе станции, то есть данные объекты капитального строительства не могут быть включены в эксплуатацию, а должны использоваться исключительно по своему основному назначению.

Существующая практика расчета улавливающих тупиков

В соответствии с существующей практикой проектирования улавливающие тупики проектируются с постепенно увеличивающимися уклонами и длиной, обеспечивающими полное погашение кинетической энергии поезда, потерявшего управление [6-7]. Расчет параметров улавливающих тупиков основана на положениях, изложенных в монографии [8].

Основным параметром улавливающего тупика является его высота (разность отметок в начале и в конце тупика), которая рассчитывается из условия равенства кинетической энергии поезда при входе в тупик и потенциальной энергии поезда в конце тупика.

$$H = \frac{V_h^2}{2g_1}$$

где V_h — начальная скорость входа поезда в тупик, м/сек;

g_1 — ускорение свободного падения, 9,81 м/сек².

Полученное значение высоты следует уменьшить за счёт учёта прочих сил сопротивления движению поезда, в том числе сопротивления движению звеньевого пути, кривых и воздушной среды, а также сил трения [9-14].

В конце улавливающего тупика перед путевым упором предусматривается отсыпка призмы из песка или гравия выше уровня головки рельса на 10-12 см. Это конструктивное решение позволяет незначительно сократить длину улавливающего тупика [15]. Погашаемая высота h_3 за счёт засыпки рельсов песком длиной l_3 определяется как:

$$h_3 = 0,06 l_3$$

Например, при проектировании улавливающего тупика на западном берегу Кольского залива, погашаемая высота составила

- за счет силы тяжести — 37,7 м (80 % от общей потребности);
- за счет сил сопротивления движению — 7,5 м (15 % от общей потребности);
- за счет засыпки рельсов песком длиной $l_3=40$ м — 2,4 м (5 % от общей потребности).

Таким образом, за счёт засыпки рельсов песком гасится до 5 % кинетической энергии улавливаемого поезда на участке длиной 40 м, что составляет 2,7 % от общей длины тупика 1500 м.

В случае, если бы можно было выполнить засыпку рельсов песком непосредственно от стрелочного перевода примыкания, то длина улавливающего тупика могла бы сократиться до 600 м или более чем в два раза.

К сожалению, такое проектное решение не может быть реализовано, ввиду того, что при промерзании грунта происходит его цементация льдом, грунт приобретает значительно большую прочность по сравнению с рыхлым песком и наезд на это место подвижного состава приведёт к его сходу с рельсов и крушению.

Предлагаемое конструктивное решение укороченного улавливающего тупика с рабочим покрытием из пенобетона

Таким образом повышение сопротивления движению поезда от конструкции верхнего строения пути эффективно, оно позволяет сократить длину улавливающего тупика. При этом решение должно обеспечивать работоспособность тупика круглогодично, независимо от температуры окружающей среды.

Авторы статьи предлагают оригинальное конструктивное решение улавливающего тупика, основная идея которого заключается в замене засыпки верхнего строения пути из песка на покрытие из пенобетона или газобетона, обладающего набором необходимых свойств, обеспечивающих с одной стороны надёжную остановку подвижного состава и сокращение длины улавливающего тупика, а с другой стороны — безопасность движения поездов. К таким свойствам следует отнести с одной стороны — небольшую прочность, чтобы колёса подвижного состава имели бы возможность разрушать пенобетон, не теряя контакта колеса и рельса, а с другой стороны — достаточно высокую вязкость, которая создавала бы дополнительное сопротивление движению потерявшего управление состава.

Остановка подвижного состава, потерявшего управление, в этом случае будет осуществляться как за счёт силы тяжести при движении на подъём, так и за счёт вязкого трения при движении колес в покрытии из пенобетона.

Учитывая вышеизложенное, в расчетную формулу определения общей погашаемой высоты можно добавить дополнительное слагаемое – силу сопротивления движению от пенобетонного покрытия:

$$\sum h = h_{\text{н}} + h_3 + h_{\text{покр}}$$

где $h_{\text{н}}$ — погашаемая высота за счет сил сопротивления;
 $h_{\text{покр}}$ — погашаемая высота за счет пенобетонного покрытия.

$$h_{\text{покр}} = \sum k_{\text{покр}} \cdot l_{\text{покр} i}$$

где $k_{\text{покр}}$ — коэффициент сопротивления;
 $l_{\text{покр} i}$ — длина участков пенобетонного покрытия.

Таким образом, пенобетон обладает следующими эксплуатационными свойствами, которые позволяют эффективно применять его в конструкции улавливающих тупиков к которым можно отнести:

- значительную способность рассеивания кинетической энергии движущегося подвижного состава;
- сохранение деформативности и вязкости при замерзании в естественной среде;
- морозостойкость, которая позволяет материалу выдерживать многократное замерзание и оттаивание не теряя эксплуатационных свойств.

Предлагаемое авторами статьи техническое решение заключается в том, что на всем протяжении улавливающего тупика на ширину шпал устраивается покрытие из пенобетона (Рис. 1).

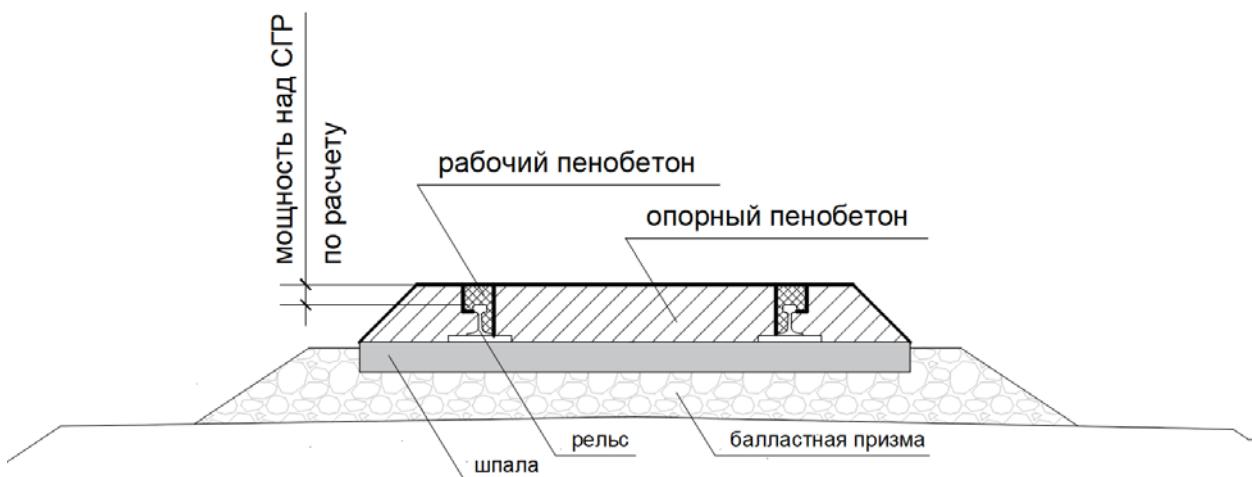


Рис. 1. Эскизное решение поперечного профиля улавливающего тупика с покрытием из пенобетона

Покрытие устраивается переменной по длине высотой (Рис. 2). Расчёт конструктивного решения должен обеспечить плавное безударное и быстрое нарастание сопротивления движению подвижному составу, и, в то же время, не допустить выдавливания вагонов.

Рабочая высота возвышения покрытия из пенобетона над головкой рельса также должна быть рассчитана по специально созданной для этого методике. Конструктивное решение рабочей зоны покрытия (зоны непосредственного взаимодействия колёс подвижного состава с рельсами) должно обеспечивать как возможность быстрого

восстановления покрытия при его нарушении колёсами подвижного состава, так и возможность выполнения диагностики и мониторинга рельсовой колеи (в коротких разрывах для локальных точек).

Для снижения общей стоимости покрытия конструктивными решениями предусмотрены две зоны укладки пенобетона с различными свойствами. Пенобетон рабочей зоны, который обладает перечисленными выше свойствами укладывается в непосредственной зоне взаимодействия колеса и рельса. Остальная конструкция верхнего строения пути укладывается опорным пенобетоном, разрушение которого не предусматривается при использовании тупика и основное назначение которого заключается в формировании полостей для укладки рабочего пенобетона. Очевидно, что опорный пенобетон будет иметь значительную меньшую стоимость за счёт отсутствия уникальных требований к его свойствам. Таким образом, при каждом использовании тупика потребуется замена только рабочего пенобетона.

Устройство покрытия требует изменения технологии очистки тупика от снега, которая должна осуществляться вручную переносными снегоуборщиками. При этом объём снегоборьбы значительно снижается, так как покрытие способствует сдуванию снега с пути.

Учитывая изложенное, предлагаемая авторами конструкция верхнего строения пути с покрытием из пенобетона обладает следующими преимуществами. Она позволяет значительно сократить длину улавливающего тупика, обеспечивает плавное и быстрое нарастание сопротивление движению поезда, устойчивость подвижного состава в рельсовой колее и возможность её локального демонтажа для выполнения работ по содержанию верхнего строения пути, то есть ремонтопригодность.

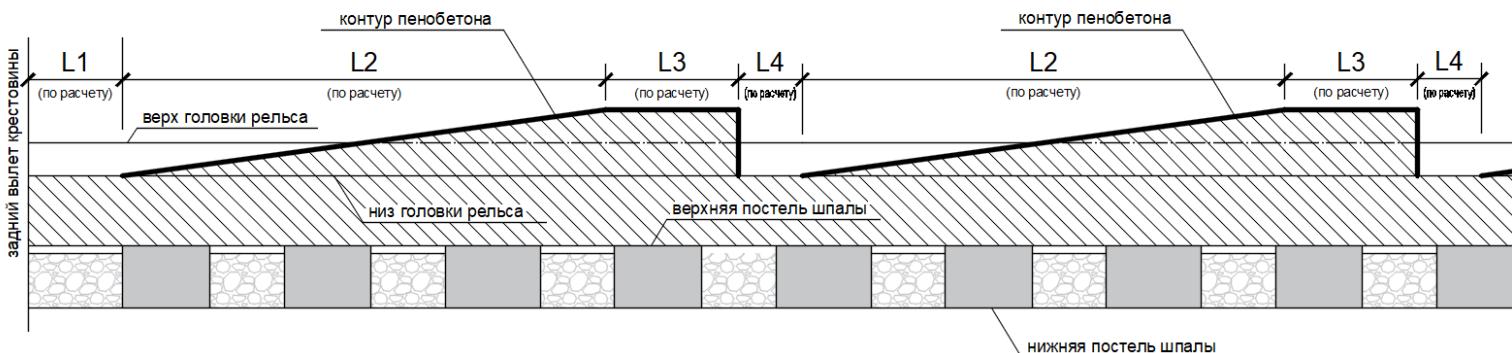


Рис. 2. Продольный профиль улавливающего тупика с покрытием из пенобетона

L1 — расстояние от заднего стыка крестовины стрелочного перевода до начала укладки пенобетона;

L2 — участок отвода мощности пенобетона от низа головки рельса до расчетной мощности над головкой рельса;

L3 — участок с расчетной мощностью пенобетона над головкой рельса;

L4 — участок укладки пенобетона до низа головки рельса
(участок мониторинга геометрии рельсовой колеи)

Заключение

Развитие технологий изготовления и совершенствование составов пенобетонов значительно расширили их характеристики, что сделало возможным их применение в конструкции железнодорожного пути на улавливающих тупиках в качестве рассеивателя кинетической энергии поезда.

Эффективность устройства покрытия из пенобетона заключается в резком снижении затрат на строительство и эксплуатацию улавливающих тупиков при безусловном обеспечении безопасности, особенно на участках пассажирского движения.

Внедрение покрытия из пенобетона в конструкции улавливающего тупика позволит внедрять в эксплуатацию поезда повышенной массы на участках с затяжными уклонами без радикальной реконструкции этих тупиков.

В настоящее время ведется оценка роли пенобетонной пыли в формировании коэффициента трения колеса по рельсу, результаты которой позволят усовершенствовать расчетную схему.

Список литературы

1. Кравчук В. В. Управление безопасностью движения поездов : монография / В. В. Кравчук, В. К. Верхотуров, Ю. В. Никулин ; В. В. Кравчук, В. К. Верхотуров, Ю. В. Никулин. М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Дальневосточный гос. ун-т путей сообщ.". Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2011. EDN QNXUKR.
2. Казаринов А. В., Морчиладзе Р.Г. Обеспечение безопасности движения на горных участках железных дорог // Современные направления и перспективы развития автотормозной техники железных дорог СССР : Сборник научных трудов / Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. М. : Транспорт, 1991. С. 70-75. EDN WFJFTT.
3. Шеламов В. Г. Определение условий следования поезда на участках с затяжными спусками // Труды 78-й студенческой научно-практической конференции РГУПС, Воронеж, 19 апреля 2019 года. Том Часть 4. Воронеж: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ростовский государственный университет путей сообщения" в г. Воронеж, 2019. С. 70-71. EDN CFVNTZ.
4. Чевгун А. Н. Обоснование максимальной скорости поездов на участке ВСМ с крутыми затяжными спусками продольного профиля // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. 2011. № 4. С. 78-83. EDN WKEZNP.
5. Верхотуров В. К. Управление тормозами тяжеловесных, длинносоставных грузовых поездов на участках железных дорог с затяжными спусками : автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд.техн. н. М., 1994. 24 с. EDN ZKACNJ.
6. Станинов Ю. П. Об использовании кинетической энергии при замедлении рудничного поезда // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 344-346. EDN LHPZPL.
7. Махметова Н. М., Рахмет Г. Т. Исследование движения поезда по перелому профиля // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : Материалы XLII Международной научно-практической конференции в рамках реализации Послания Президента РК Н. Назарбаева "Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции", Алматы, 18 апреля 2018 года / Под редакцией Б.М. Ибраева. Том 4. Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2018. С. 195-199. EDN XVYFVJ.
8. Гургенидзе В. М. Улавливающие тупики : монографи. М. : Транскелдориздат, 1955. 70 с.
9. Малиновский Ю., Ткаченко А., Бондарец А. Особенности расчета сопротивлений движению конвейерных поездов [et al.] // European Science. 2023. No. sge20-02. Р. 7-34. DOI 10.30890/2709-2313.2023-20-02-008. EDN FPDLYJ.
10. Лагерев С. Ю., Суслов О. А., Филатов Е. В., Карпов И. Г. Сопротивление движению поездов и расходы на его преодоление // Вестник транспорта Поволжья. 2011. № 4(28). С. 58-62. EDN OCSNVL.
11. Чаганова О. С. Сравнение методик расчета сил сопротивления движению поездов // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.И. Кулаженко. Том Часть 1. Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2022. С. 184-186. EDN LHQLJU.

12. Рычков Н. П., Тарбина Т. А. Условия возникновения и реализации тормозной силы // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 556-560. EDN WHUPUP.
13. Зеньчук Н. Ф. Взаимосвязь механической работы сил сопротивления подвижного состава и пути с расходами по восстановлению их работоспособности // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2008. № 1(16). С. 155-158. EDN KJXKGM.
14. Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд // Известия Транссиба. 2022. № 4(52). С. 13-22. EDN CGNNYZ.
15. Беляев В. И., Малафеев В. А. Защита подвижного состава при наезде на тупиковую призму // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 3. С. 20-24. EDN MHUZAZ.

References

1. Kravchuk V. V. Train safety management : a monograph / V. V. Kravchuk, V. K. Verkhoturov, Yu. V. Nikulin ; V. V. Kravchuk, V. K. Verkhoturov, Yu.V. Nikulin ; Moscow Transport. Of the Russian Federation, Federal Agency of Railway Transport, State Educational Institution of Higher Education. Prof. Far Eastern State University of Communication Routes. Khabarovsk : DVGUPS Publishing House, 2011. ISBN 978-5-262-00549-9. EDN QNXUKR.
2. Kazarinov A.V., Morghiladze R.G. Ensuring traffic safety on mountainous sections of railways // Modern trends and prospects for the development of auto-braking equipment of the USSR railways : A collection of scientific papers / All-Union Scientific Research Institute of Railway Transport. Moscow : Transport Publ., 1991, pp. 70-75. EDN WFJFTT.
3. Shelamov V. G. Determination of train conditions in sections with long descents // Proceedings of the 78th Student Scientific and Practical Conference of the Russian State Pedagogical University, Voronezh, April 19, 2019. Volume Part 4. Voronezh: Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State University of Railway Transport" in Voronezh, 2019. pp. 70-71. EDN CFVNTZ.
4. Chevgun A. N. Justification of the maximum speed of trains on the HSR section with steep, protracted slopes of the longitudinal profile // Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N.Isanov. 2011. No. 4. pp. 78-83. EDN WKEZNP.
5. Verkhoturov V. K. Brake control of heavy, long-compound freight trains on railway sections with long descents : specialty 05.22.07 "Railway rolling stock, train traction and electrification" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences Moscow, 1994. 24 p. EDN ZKACNJ.
6. Stashinov Yu. P. On the use of kinetic energy when slowing down a mining train // Mining information and Analytical bulletin. 2009. No. 5. pp. 344-346. EDN LHPZPL.
7. Makhmetova N. M., Rakhmet G. T. Investigation of train movement by profile fracture // Innovative technologies in transport: education, science, practice : Proceedings of the XLII International Scientific and Practical Conference in the framework of the implementation of the Message of the President of the Republic of Kazakhstan N. Nazarbayeva "New development opportunities in the context of the Fourth Industrial Revolution", Almaty, April 18, 2018 / Edited by B.M. Ibraev. Volume 4. Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev, 2018. pp. 195-199. EDN XVFVJ.
8. Gurgenidze V. M. Catching dead ends : a monograph. Moscow : Transzheldorizdat, 1955. 70 p.
9. Malinovsky Yu., Tkachenko A., Bondarets A. Features of calculating resistance to movement of conveyor trains [et al.] // European Science. 2023. No. sge20-02. P. 7-34. DOI 10.30890/2709-2313.2023-20-02-008. EDN FPDLYJ.

10. Lagerev S. Yu., Suslov O. A., Filatov E. V., Karpov I. G. Resistance to train movement and costs of overcoming it // Bulletin of Transport of the Volga region. 2011. № 4(28). Pp. 58-62. EDN OCSNVL.
11. Chaganova O. S. Comparison of methods for calculating resistance forces to train movement // Problems of transport safety : Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway. In 2 parts, Gomel, November 24-25, 2022 / Under the general editorship of Yu.I. Kulazhenko. Volume Part 1. Gomel: Educational Institution "Belarusian State University of Transport", 2022. pp. 184-186. EDN LHQLJU.
12. Rychkov N. P., Tarbina T. A. Conditions of occurrence and realization of braking force // Transport infrastructure of the Siberian region. 2016. Vol. 2. pp. 556-560. EDN WHUPUP.
13. Zenchuk N. F. The relationship of the mechanical work of the resistance forces of rolling stock and track with the costs of restoring their operability // Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. 2008. № 1(16). Pp. 155-158. EDN KJXKGM.
14. Grebnev I. A., Pudovikov O. E. To assess the effect of wind load on a freight train // Izvestiya Transsib. 2022. № 4(52). Pp. 13-22. EDN CGNNYZ.
15. Belyaev V. I., Malafeev V. A. Protection of rolling stock when hitting a dead-end prism // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport. 2010. No. 3. pp. 20-24. EDN MHUZAZ.

Факторы повышения ранней прочности шлаковых бетонов с добавками

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0020>

Номер статьи: C0020

Сметанин Алексей Алексеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, аспирант

Санкт-Петербург, Россия

citysell1@gmail.com

Нуриев Али Гасаналиевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, магистрант

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3617-9118

informatiks20@gmail.ru

Гиндуллин Тимур Русланович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, студент

Санкт-Петербург, Россия

mr.timurik2007@yandex.ru

Статья получена: 02.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Введение гранулированного доменного шлака в цементные составы является одним из ключевых резервов для повышения как экономической эффективности цементных составов с точки зрения стоимости и расхода цемента, так и для улучшения технических свойств. В работе представлены результаты исследования кинетики набора ранней прочности на сжатие бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака (граншлака) в зависимости от количества граншлака и добавки в составах портландцемент-граншлак. Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с 70% содержанием граншлака в возрасте 12 и 24 часов при нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка, содержащая суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%. При тепловлажностной обработке при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и суперпластификатор на основе поликарбоксилата обеспечивают увеличение ранней прочности до 80%.

Ключевые слова: устойчивое развитие, экологичное строительство, поликарбоксилатный суперпластификатор, сульфат натрия, ранняя прочность

Factors for increasing the early strength of slag concretes with additives

Smetanin Alexey Alekseevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
postgraduate student

St. Petersburg, Russia

citysell1@gmail.com

Nuriev Ali Gasanalievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
master's student
St. Petersburg, Russia
informatiks20@gmail.ru

Gindullin Timur Ruslanovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
student
St. Petersburg, Russia
mr.timurik2007@yandex.ru

Abstract. The introduction of granular blast furnace slag into cement compositions is one of the key reserves for increasing both the economic efficiency of cement compositions in terms of cost and consumption of cement, and for improving technical properties. The paper presents the results of a study of the kinetics of the early compressive strength of concrete based on ground granular blast furnace slag (granslak), depending on the amount of granslak and additives in the compositions of Portland cement granslak. The most effective additive for increasing the strength of cement-based concrete with 70% granulated slag content at the age of 12 and 24 hours under normal hardening conditions is a two-component additive containing a superplasticizer based on sulfonaphthalene formaldehyde in an amount of 50% and Na_2SO_4 in an amount of 50%. During heat and moisture treatment at 60 °C, both a two-component additive and a polycarboxylate-based superplasticizer provide an increase in early strength of up to 80%.

Keywords: sustainable development, eco-friendly construction, polycarboxylate superplasticizer, sodium sulfate, early strength

Введение

Мировая цементная промышленность наращивает производство цемента, содержащего тонкодисперсные компоненты различных шлаков. Это позволяет экономить ресурсы природного сырья за счет использования промышленных побочных продуктов, а также снижать выбросы CO_2 и улучшать технологические характеристики бетонной смеси, такие как удобоукладываемость, и технические характеристики затвердевшего бетона [1]. Цемент на основе гранулированного доменного шлака (портландцемент/шлак), производимый путем совместного помола клинкера, шлака и гипса, имеет более продолжительное время схватывания по сравнению с портландцементом с тем же составом клинкера. Начало схватывания наступает через 4-6 часов, конец — через 10-12 часов [2]. Для ускорения твердения бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака можно использовать: тепловлажностную обработку, водоредуцирующую добавку, ускоритель твердения, уменьшение размера частиц шлака путем помола [3].

Тепловлажностная обработка с температурой более 80°C используется для производства бетона на основе гранулированного доменного шлака. Однако, это приводит к снижению морозостойкости бетона. Ухудшение физико-механических свойств и долговечности бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке при температуре 80°C и выше, можно объяснить образованием вторичного этtringита ($[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}] (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), что указывает на необходимость снижения температуры пропаривания и использования других методов повышения ранней прочности или комбинации нескольких методов [1-3].

С развитием технологии помола стало возможным получение тонких минеральных наполнителей из гранулированного доменного шлака с удельной поверхностью, превышающей удельную поверхность портландцемента, с последующим смешиванием портландцемента и тонкомолотого шлака. Среди факторов положительного влияния тонкомолотого шлака на структуру цементной матрицы можно выделить следующие: увеличение ранней прочности бетона с тонкодисперсными минеральными добавками из

шлака, что позволяет снизить температуру при тепловлажностной обработке; усиление пластифицирующего эффекта суперпластификатора в некоторых составах портландцемент-шлак, что позволяет уменьшить количество воды [4]. Снижение количества воды за счет использования водоредуцирующей добавки уменьшает капиллярную пористость бетона, тем самым повышая его плотность и морозостойкость [27-30].

Введение щелочного активатора решает проблему композитных цементов — низкой ранней прочности и увеличения времени схватывания. Доказано [5], что добавление NaOH в цемент ПЦ/шлак приводило к сокращению времени схватывания с увеличением дозировки NaOH . В работе [6] показано, что значительное увеличение прочности цемента ПЦ/шлак может быть достигнуто путем добавления 4% Na_2SO_4 . Добавление силиката натрия очень значительно увеличивало раннюю прочность растворов ПЦ/шлак. Композитные цементы сочетают положительные характеристики традиционных материалов на основе портландцемента с характеристиками щелочно-активированных материалов, создавая материалы с повышенной долговечностью и механическими свойствами.

Для повышения ранней прочности бетона на основе цемента ПЦ/шлак необходимо изучить влияние комбинации добавки суперпластификатора и ускорителя твердения Na_2SO_4 , а также сравнить ее с поликарбоксилатным суперпластификатором. Для повышения морозостойкости бетона необходимо снизить температуру тепловлажностной обработки без увеличения продолжительности обработки и при обеспечении требуемой ранней прочности.

Методы и материалы

При исследовании использованы методы количественного и гравиметрического анализа, а также методы определения свойств и микроскопии.

Использовались обычный портландцемент (ЦЕМ 42,5) и тонкомолотый граншлак с распределением частиц по размерам, полученным с помощью анализатора «Analysette 22». Распределение частиц по размерам показано в Таблице 1. Химический состав граншлака представлен в Таблице 2. В качестве добавки была выбрана водоредуцирующая добавка на основе поликарбоксилатов (РСЕ), которая благодаря определенной структуре молекулы подходит для производства сборного железобетона. Другая добавка содержала два компонента: суперпластификатор на основе сульфонафталиинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%.

Таблица 1
Распределение частиц по размерам

Количество частиц размером менее, %			
1 мкм	5 мкм	10 мкм	50 мкм
6.2	31.8	48.1	93.9

Таблица 2
Химический состав граншлака, %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3
42.8	35.9	11.4	0.27	0.33	6.44	2.4

Экспериментальные результаты и дискуссия

Молотый шлак содержит 48,1% частиц размером менее 10 мкм. Водопотребность цементного теста без граншлака составляет 27,5%. Однако при замене части портландцемента на граншлак в количестве 70% водоцементное отношение становится 30,9%. Увеличение водопотребности цементного теста приводит к увеличению

водопотребности бетонных смесей, что снижает прочность и морозостойкость затвердевшего бетона. Соответственно, целесообразно использовать водоредуцирующие добавки при применении тонкомолотых наполнителей из граншлака в бетонной смеси.

Влияние количества тонкомолотого граншлака на прочность бетона исследовали после тепловлажностной обработки при разных температурах и в возрасте 28 дней, как показано в Таблице 3. Соотношение вяжущего к песку было равно 1:3.

Было установлено, что прочность образцов после тепловлажностной обработки при температуре 60°C и продолжительности 12 часов, в которых часть портландцемента была заменена тонкомолотым граншлаком в количестве 70%, соответствовала прочности образцов без шлака после тепловлажностной обработки при температуре 80°C. Снижение прочности образцов, подвергнутых тепловлажностной обработке при температуре 80°C, наблюдалось в возрасте 28 дней. Также наблюдалось снижение прочности образцов, изготовленных с использованием вяжущего с соотношением цемента к шлаку 30:70, из-за увеличения водоцементного отношения. Оптимальным можно считать соотношение цемента к шлаку, равное 50:50.

Таблица 3
Прочность бетона после тепловлажностной обработки
при разных температурах

Качество тонкого граншлака, %	Вода/Вяжущие	Прочность сжатия, МПа			
		80°C		60°C	
		После обработки	28 дней	После обработки	28 дней
0	0.362	34.1	47.6	32.9	50.2
50	0.370	42.2	51.1	35.9	53.7
70	0.376	39.1	48.1	33.9	49.2

При использовании тонкомолотого граншлака в бетонных смесях целесообразно применять водоредуцирующие добавки. С другой стороны, большое значение имеет влияние добавки на параметры тепловлажностной обработки, такие как продолжительность выдержки бетона и скорость подъема температуры, в связи с тем, что суперпластификаторы влияют на время схватывания цементного теста, а именно могут замедлять гидратацию минеральных частиц [7]. В этих случаях количество добавок следует назначать с учетом влияния добавки на время схватывания цементного теста, а не исходя из максимального водоредуцирующего эффекта [8].

С увеличением количества водоредуцирующей добавки на основе поликарбоксилата начало и конец схватывания растягиваются, несмотря на снижение количества воды в тестах с равной подвижностью. Двухкомпонентная добавка с суперпластификатором на основе сульфонафталиинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50% показала меньшее влияние на время схватывания цементных тест. Определение времени схватывания проводилось для цементного теста с соотношением цемента к шлаку 50:50 и показано на Рис. 1.

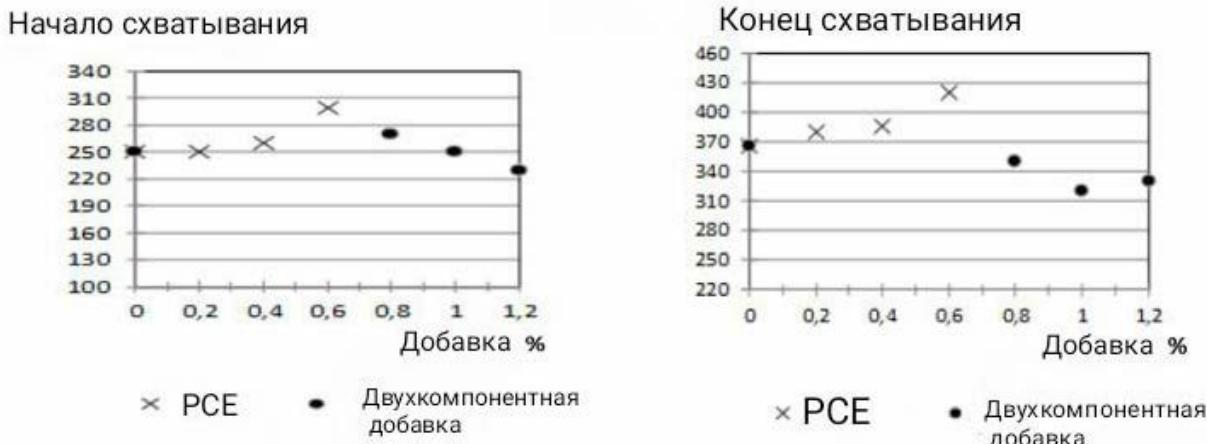


Рис.1. Влияние количества добавок на начало конец схватывания цементного теста

Многие исследователи показали, что количество суперпластификатора для получения цементных тест с идентичной подвижностью зависит от типа и дисперсности ультратонких минеральных наполнителей. Например, авторы работы [4] показали, что количество суперпластификатора в тестах граншлак-цемент с одинаковой подвижностью в значительной степени зависит от типа и количества наполнителей из граншлака, но не от дисперсности молотого шлака. Было установлено, что увеличение водоредуцирующего эффекта выбранной поликарбоксилатной добавки зависит как от типа граншлака, так и от его количества. Оптимальное количество граншлака, обеспечивающее максимальное увеличение водоредуцирующего эффекта добавки, составляет 50% от массы портландцемента [4].

Следовательно, использование оптимального количества граншлака, обеспечивающего максимальный водоредуцирующий эффект добавки, позволяет уменьшить количество воды, что способствует повышению ранней прочности бетона.

Снижение количества воды в растворах с 50 и 70 процентами граншлака при добавлении РСЕ в количестве 0,4% можно оценить в 19% и 13% соответственно, как показано в Таблице 4. Таким образом, оптимальное соотношение портландцемента к тонкомолотому гранулированному доменному шлаку было подтверждено и составило 50:50 для увеличения водоредуцирующего эффекта РСЕ.

Однако, часто используется цемент, содержащий до 70% граншлака. Соответственно, было изучено влияние добавок на раннюю прочность бетона на основе цемента с содержанием граншлака в количестве 70% в нормальных условиях твердения и после тепловлажностной обработки при температуре 60°C, как показано в Таблице 5.

Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с содержанием граншлака 70% в возрасте 12 и 24 часов в нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка с суперпластификатором на основе сульфонафталиновольфегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%. Однако в условиях тепловлажностной обработки при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и РСЕ обеспечивают увеличение прочности до 80%.

Таблица 4
Водоредуцирующий эффект (Вр) РСЕ и прочность на сжатие

Добавка, %	Диаметр расплыва, мм	В/В	Кол-во воды, %	Прочность на сжатие, МПа		
				12 часов	24 часа	28 дней
Цемент, шлак = 30:70; хранение при 20-22°C						
-	106	0.48	-	1.4	3.6	29.4
РСЕ (0.4%)	107	0.42	13	1.6	4.0	45.8
Цемент, шлак = 50:50; хранение при 20-22°C						
-	107	0.47	-	1.7	4.9	34.5
РСЕ (0.4%)	107	0.38	19	2.6	8.9	51.6

Таблица 5.
Кинетика твердения бетона

Добавка, %	В/В	Прочность на сжатие, МПа /%		
		12 часов	24 часа	28 дней
Хранение при 20-22°C				
-	0.48	<u>1.4</u> 100	<u>3.6</u> 100	<u>29.4</u> 100
Двухкомпонентная* (0.8%)	0.42	<u>1.9</u> 136	<u>4.3</u> 119	<u>44.9</u> 153
Двухкомпонентная* (1.6%)	0.37	<u>2.5</u> 179	<u>6.5</u> 180	<u>52.4</u> 178
РСЕ (0.4%)	0.42	<u>1.6</u> 114	<u>4.0</u> 111	<u>45.8</u> 156
После тепловлажностной обработки при 60°C				
-	0.47	<u>5.2</u> 100	<u>14.9</u> 100	<u>37.6</u> 100
Двухкомпонентная * (0.8%)	0.42	<u>9.6</u> 184	<u>17.2</u> 115	<u>45.8</u> 122
РСЕ (0.4%)	0.42	<u>9.5</u> 183	<u>18.4</u> 123	<u>46.9</u> 125

* Двухкомпонентная добавка — суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%.

Заключение

В работе показано совокупное влияние факторов, способствующих повышению ранней прочности бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака: температуры тепловлажностной обработки, использования водоредуцирующей добавки, ускорителя твердения, тонкости помола частиц шлака. Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с содержанием граншлака 70% в возрасте 12 и 24 часов в нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка, содержащая суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%. Однако в условиях тепловлажностной обработки при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и РСЕ обеспечивают увеличение прочности до 80%.

Список литературы

1. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M. Technological approaches to increase the quality of lightweight concrete based on hybrid binders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666, No. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012038>

2. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M., Palomo, Á., Menendez Pidal, I., Romana, M. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete // Materials. 2021. 14(2). P. 403. <https://doi.org/10.3390/ma14020403>
3. Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplík, J., Tan, H., Gu, X. Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment // Sustainability. 2021. 13(1). P. 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
4. Smirnova, O. M., Potyomkin, D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(7). Pp. 874-880. EDN: YBLPUT
5. Jiang, W., Alkali-activated Cementitious Materials: Mechanism, Microstructure and Properties. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, US, 1997.
6. Singh, N., Rai, S. and Singh, N.B. Effect of sodium sulphate on the hydration of granulated blast furnace blended Portland cement // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2001. 8(2). Pp. 110-113
7. Kazanskaya, L., Smirnova, O. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track slabs // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 06022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706022>
8. Kazanskaya, L. Estimation of Portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_62

References

1. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M. Technological approaches to increase the quality of lightweight concrete based on hybrid binders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666, No. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012038>
2. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M., Palomo, Á., Menendez Pidal, I., Romana, M. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete // Materials. 2021. 14(2). P. 403. <https://doi.org/10.3390/ma14020403>
3. Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplík, J., Tan, H., Gu, X. Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment // Sustainability. 2021. 13(1). P. 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
4. Smirnova, O. M., Potyomkin, D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(7). Pp. 874-880. EDN: YBLPUT
5. Jiang, W., Alkali-activated Cementitious Materials: Mechanism, Microstructure and Properties. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, US, 1997.
6. Singh, N., Rai, S. and Singh, N.B. Effect of sodium sulphate on the hydration of granulated blast furnace blended Portland cement // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2001. 8(2). Pp. 110-113
7. Kazanskaya, L., Smirnova, O. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track slabs // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 06022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706022>
8. Kazanskaya, L. Estimation of Portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_62

Разработка составов долговечных цементных композитов для люков смотровых колодцев

УДК 624.137

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0021>

Номер статьи: C0021

Смирнова Ольга Михайловна

кандидат техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщений Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия.

smirnovaolgam@rambler.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 04.12.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Разработаны составы фибробетонов для изготовления крышек люков смотровых колодцев, которые удовлетворяют требованиям нормативных документов. Определены предел прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при изгибе, соответствующий при первой микротреции, удельная работа разрушения, деформационное упрочнение после образования первой микротреции, величина прогиба.

Ключевые слова: фибробетон, удельная работа разрушений, диаграмма деформирования, прочность на растяжение при изгибе

Engineering of compositions of durable cement fiber composites for manholes

Smirnova Olga Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russia

smirnovaolgam@rambler.ru

Abstract. Fiber-reinforced concrete compositions have been developed for the manufacture of manhole covers for inspection wells that meet the requirements of regulatory documents. The compressive strength, the bending tensile strength corresponding to the first microcrack, the specific work of destruction, deformation hardening after the formation of the first microcrack, and the deflection value are determined.

Keywords: fiber-reinforced concrete, specific work of destruction, deformation diagram, flexural tensile strength

Обзор литературы и обоснование актуальности исследования

Люки смотровых колодцев и дождеприемники ливнесточных колодцев, как правило, изготавливают из серого или высокопрочного чугуна. Серые и высокопрочные чугуны используются в конструкциях, работающих на статическую нагрузку (колонны, фундаментальные плиты под фермы, балки, канализационные трубы, люки, задвижки). Следует отметить, что ГОСТ 3634 требует изготавливать конструкции, а именно крышки люков смотровых колодцев типов ЛМ (легкий малогабаритный) и Л (легкий) с минимальной номинальной нагрузкой не менее 15 кН. Такие люки разрешается использовать для

пешеходных зон. Для автостоянок номинальная нагрузка на такие конструкции составляет от 125 кН, для проезжей части от 250 кН.

Отсутствие расширенных требований в нормативных документах к выбору исходных компонентов для изготовления люков на основе композиционных материалов гидратационного твердения обуславливает необходимость проведения исследований в данном направлении.

Чугунные крышки необходимо менять: за первые 3 месяца 2024 года Водоканал заменил почти 400 поврежденных крышек люков⁸. Кроме материального ущерба, открытый люк представляет опасность для пешеходов. Аналогичная ситуация существует и в других регионах России, отмечается значительное количество полученных травм от падений в открытые люки. Эта проблема требует решений, одним из которых может быть замена чугуна на композиционный материал с требуемыми свойствами, имеющий в своем составе цементный бетон, полимерную микрофибрю, чугунный ободок с прутьями, при необходимости стальную проволоку для армирования.

Анализ зарубежных информационных источников также подтверждает опыт использования цементных композитов в конструкциях люков для зон с высокими нагрузками, в том числе крышек люков. В европейской системе стандартов нормативные документы на материалы крышек люков были обновлены в 2015 году. Значительно расширен список материалов, которые можно использовать для получения крышек люков. Согласно EN-124 на основе цементного бетона можно изготавливать крышки люков, как для пешеходных зон, так и для зон с высочайшими нагрузками, например аэродромов. Согласно европейскому стандарту EN-124-4 «Крышки люков на основе армированного бетона» крышки можно изготавливать на основе армированного цементного бетона шести групп:

- А15 — для пешеходной зоны и велосипедных дорожек;
- В125 — для пешеходной зоны и парковок;
- С250 — для автодорог с небольшой нагрузкой;
- Д400 — для автодорог с большой нагрузкой;
- Е600 и F900 — для аэродромов.

Также в EN-124-4 отмечается, что необходимо разрабатывать новые цементные составы, которые могут быть объектами интеллектуальной собственности.

На сегодняшний день бетоны, дисперсноармированные микро- или макрофиброй на полимерной основе (далее фибробетоны), являются эффективными строительными материалами и начинают достаточно широко использоваться в транспортном и подземном строительстве, ремонте и усилении железобетонных конструкций [1-3]. Результаты экспериментальных работ по подбору вида и расхода полимерной фибры и цементного камня показывают повышение прочности на растяжение, ударной прочности, морозостойкости и истираемости фибробетона [4-6]. Таким образом, полученные результаты, доказывают возможность получения новых композиционных материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Это позволяет использовать их в конструкциях люков и дождеприемников, которые нормативный документ EN-124-4 относит к группам А15 и В125.

Также следует отметить, что одним из преимуществ использования крышек люков на основе цементных композитов в пешеходной зоне является возможность создания декоративной поверхности, соответствующей выбранным архитектурным решениям.

В данной работе ставится цель разработать состав долговечного цементного композита для изготовления крышек люков смотровых колодцев типов ЛМ и Л. Выше рассмотрены основные технические требования к крышкам люков согласной действующим нормативным документам. Необходимо обосновать выбор композиционного материала с

⁸ Глуз А. Водоканал заменил почти 400 поврежденных крышек люков с начала 2024 года // Вечерний Санкт-Петербург. 28.03.2024. URL: <https://vecherka-spb.ru/2024/03/28/vodokanal-zamenil-pochti-400-povrezhdennikh-krishek-lyukov-s-nachala-2024-goda>

требуемыми свойствами, имеющий в своем составе цементный бетон, полимерную микрофибру, установить корреляционные зависимости между составом фибробетона и значениями предела прочности на сжатие, на растяжение при изгибе, относительной деформации на растяжение при изгибе.

Результаты исследования

Для исследования свойств разработанных композитов, были приготовлены составы с расплывом конуса 130-186 мм (Таблица 1). Расплыв конуса определялся по ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии». Образцы-балочки размером 4×4×16 см были изготовлены для испытания на прочность при изгибе и сжатии. Образцы твердели при $t=20^{\circ}\text{C}$ и 100% влажности воздуха и в возрасте 28 суток были испытаны на растяжение при изгибе и сжатие согласно ГОСТ 310.4-81. Исследование по определению механических свойств выполнено с помощью сервогидравлической системы MTS 816. Оборудование позволяет проводить испытания образцов на сжатие и на трехточечный изгиб. Три образца были испытаны для каждого состава в возрасте 28 дней. Расчет удельной работы разрушения был выполнен по ГОСТ 23020-78 как отношение площади под кривой деформирования к объему образца. Деформационное упрочнение после образования первой микротрещины определялось как разница между прочностью, соответствующей разрушению образца и прочностью, соответствующей первой микротрещине. Результаты испытаний образцов в виде диаграмм деформирования представлены на Рис. 1-2.

Таблица 1
Составы и свойства цементных фиброкомпозитов по объему

<i>Состав</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
ЦЕМ I 42.5	44,92	44,2
Указанный молотый кварцевый песок	10,63	10,65
Кварцевый песок фракции 0,06-2 мм	5,47	5,45
Песок речной с модулем крупности 1,9	-	-
Суперпластификатор MC PowerFlow 7951(5)	3,3	3,3
Добавка Петролафс	-	-
Полипропиленовое волокно	4,4	5,5
Вода	31,28	30,9
Плотность в возрасте 28 суток, кг/м ³	2120	2070
Предел прочности при сжатии, МПа	79,6	68,1
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа (при первой микротрещине)	7,93	5,81
Удельная работа разрушения, Дж/м ³	22200,4	23176,9
Деформационное упрочнение после образования первой микротрещины, МПа	0	0,64
Величина прогиба, мм	1,15	1,17

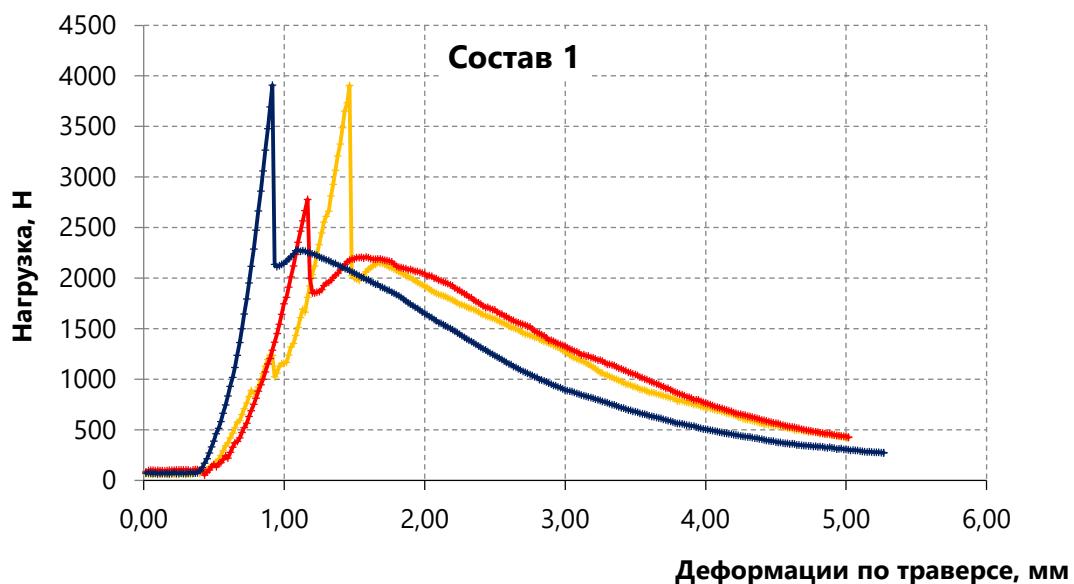


Рис. 1. Кривые деформирования трех образцов цементного композита с расходом полипропиленовой микрофибры в количестве 4.4% по объему

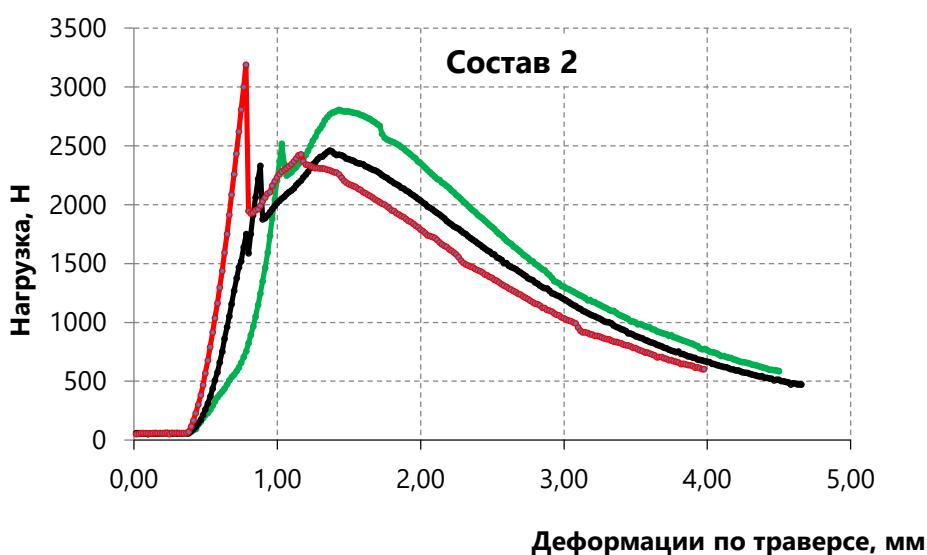


Рис. 4. Кривые деформирования трех образцов цементного композита с расходом полипропиленовой микрофибры в количестве 5.5% по объему

Результаты исследования разработанных фиброкомпозитов показывают, что по прочностным характеристикам они соответствуют требованиям нормативных документов для применения в конструкциях люков смотровых колодцев.

Высокая относительная деформация до 5% является результатом последовательного образования множественных, плотно расположенных микротрещин при возрастающем растягивающем напряжении. Такое поведение при растяжении достигается выполнением ряда микромеханических условий для образования микротрещин, их распространения и перекрывания фиброй [7-10]. Учитывая высокую деформационную способность композита, его можно применять не только в качестве основного материала в конструкциях, но и в качестве тонких упрочняющих слоев для ремонта и усиления существующих конструкций [11-13]. Наличие таких свойств фиброкомпозитов позволяет снижать материалоемкость и одновременно повышать надежность строительных конструкций или отдельных их элементов, работающих при растягивающем нагружении с различной скоростью, а также

использовать для ремонта бетонных конструкций благодаря технологичности нанесения свежеприготовленной растворной смеси.

Список литературы

1. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволочной фиброй, Academia. // Архитектура и строительство. 2018. № 2. С. 143-147.
2. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2022. С. 358-363.
3. Uterov Y.B., Akhmetov D.A., Root Y.N., Yermuhanbet M.A. Reinforcement of self-compacting concrete with polypropylene fiber. // Bull. Civ. Eng. 2019. № 6. pp. 220-227
4. Smirnova O. M., Belentsov Y. A., Kharitonov A. M., Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018.DOI: 10.1016/j.jtte.2017.12.004
5. Heravi A.A., Smirnova O., Mechtcherine V. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). // RILEM Bookseries. 2018. Т. 15. С. 266-274.
6. Смирнова О.М., Харитонов А.М. Прочностные и деформативные свойства фибробетона с макрофиброй на основе полиолефинов. // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 44-49.
7. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И., Кострикин М.П. Совершенствование метода определения величины сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне. // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году. Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах. Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Москва, 2021. С. 208-216.
8. Ахметов Д.А., Пухаренко Ю.В., Роот Е.Н., Ахажанов С.Б. Влияние мелкодисперсных наполнителей из техногенных отходов и низкомодульного фиброволокна на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов. // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 5 (88). С. 102-108.
9. Murali, G. et. al. Impact Resistance of Functionally Layered Two-Stage Fibrous Concrete. // Fibers. 2021. 9(12), 88.
10. Lesovik, V. et. al. 3D-Printed Mortars with Combined Steel and Polypropylene Fibers. // Fibers. 2021. 9(12), 79.
11. Lusis, V. et. al. Experimental Investigation and Modelling of the Layered Concrete with Different Concentration of Short Fibers in the Layers. // Fibers. 2021. 9(12), 76.
12. Enfedaque, A., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., & Proaño, J. S.. Assessment of the Post-Cracking Fatigue Behavior of Steel and Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete. // Materials. 2021. 14(22), 7087.
13. Abousnina, R. et. al. Mechanical Properties of Macro Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. // Polymers. 2021. 13(23), 4112.

References

1. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Diagrams of deformation of cement composites reinforced with steel wire fiber, Academia. // Architecture and construction. 2018. No. 2. pp. 143-147.
2. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Analysis of the behavior of fiber reinforced concrete reinforced with various types of fiber under load // Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Natural Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021. Collection of scientific papers of the Russian Academy of Sciences. Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Moscow, 2022. pp. 358-363.
3. Utepov Y.B., Akhmetov D.A., Root Y.N., Yermuhanbet M.A. Reinforcement of self-compacting concrete with polypropylene fiber. // Bull. Civ. Eng. 2019. № 6. pp. 220-227
4. Smirnova O. M., Belentsov Y. A., Kharitonov A. M., Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.12.004
5. Heravi A.A., Smirnova O., Mechtcherine V. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). // RILEM Bookseries. 2018. T. 15. C. 266-274.
6. Smirnova O. M., Belentsov Y. A., Kharitonov A. M., Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete / Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018. (indexed in Scopus) DOI.org/10.1016/j.jtte.2017.12.004
7. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I., Kostrikin M.P. Improvement of the method for determining the adhesion of reinforcing fibers to the matrix in fiber-reinforced concrete. In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Natural Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020. Collection of scientific papers of the Russian Academy of Natural Sciences: in 2 volumes. The Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN). Moscow, 2021. pp. 208-216.
8. Akhmetov D.A., Pukharenko Yu.V., Root E.N., Akhazhanov S.B. The effect of fine fillers from man-made waste and low-modulus fibroblast on the workability of self-compacting concretes. Bulletin of Civil Engineers. 2021. No. 5 (88). pp. 102-108.
9. Murali, G. et. al. Impact Resistance of Functionally Layered Two-Stage Fibrous Concrete. // Fibers. 2021. 9(12), 88.
10. Lesovik, V. et. al. 3D-Printed Mortars with Combined Steel and Polypropylene Fibers. // Fibers. 2021. 9(12), 79.
11. Lusis, V. et. al. Experimental Investigation and Modelling of the Layered Concrete with Different Concentration of Short Fibers in the Layers. // Fibers. 2021. 9(12), 76.
12. Enfedaque, A., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., & Proaño, J. S.. Assessment of the Post-Cracking Fatigue Behavior of Steel and Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete. // Materials. 2021. 14(22), 7087.
13. Abousnina, R. et. al. Mechanical Properties of Macro Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. // Polymers. 2021. 13(23), 4112.

Многослойная защитная конструкция, напечатанная на строительном 3D-принтере. Физика прохождения упругой волны через неё

УДК 624.137

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0022>

Номер статьи: C0022

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой строительных материалов и технологий

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

Amsychova@yandex.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

адъюнкт

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg@gmail.ru

Шашков Алексей Иванович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
факультет инженерного и электромеханического обеспечения, начальник лаборатории

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2439-0049

Alekseyshashkov@internet.ru

Морозов Иван Сергеевич

Войсковая часть 14003

Санкт-Петербург, Россия

Статья получена: 02.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. В работе представлен анализ динамических свойств многослойных защитных конструкций, сформированных аддитивным методом (3D-печатью), с акцентом на механику упругих волн. Рассматривается эволюция от квазистатических характеристик (2010-е гг.) к динамическим (2020-е гг.), включая фрактальные структуры типа Koch для управления дисперсией волн. Аддитивное производство обеспечивает контролируемую микроструктуру с интеграцией армирующих элементов (таких как фибра), минимизируя отходы и реализуя зоны запрета по теории Блоха-Флоке. Детализирована физика упругих волн: классификация; скорости распространения; взаимодействие их с границами слоёв разных акустических импедансов. Энергопоглощение моделируется гистерезисной петлёй, с источниками диссипации: гистерезисные, конструкционные и аэрогидродинамические. Коэффициент энергопоглощения повышается армированием фиброй, с фазами разрушения: предтрещиновая, трещиновая и посттрещиновая. Цель — моделирование волновой динамики в 3D-конструкциях, выявление преимуществ и недостатков

ограждающих конструкций возведенных аддитивным способом по сравнению с традиционными монолитными изделиями.

Ключевые слова: многослойная конструкция, энергопоглощение, упругие волны, импеданс, аттенюация, фибра.

Multi-layer protective structure printed on a construction 3D printer. Physics of elastic wave passing through it

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Dr. tech. Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia
Amsychova@yandex.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
adjunct
Saint Petersburg, Russia
Nesterovoleg@gmail.ru

Shashkov Aleksei Ivanovich

Ph.D. tech. Sciences,
A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
Faculty of Engineering and Electromechanical Support, Head of Laboratory
Saint Petersburg, Russia
Alekseyshashkov@internet.ru

Morozov Ivan Sergeevich

Military Unit 14003
Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of the dynamic properties of multilayer protective structures formed by the additive method (3D printing), with an emphasis on the mechanics of elastic waves. The evolution from quasi-static characteristics (2010s) to dynamic ones (2020s), including Koch-type fractal structures for controlling wave dispersion, is considered. Additive manufacturing provides a controlled microstructure with the integration of reinforcing elements (such as fiber), minimizing waste and implementing exclusion zones according to the Bloch-Floquet theory. The physics of elastic waves is detailed: classification; propagation velocities; their interaction with the boundaries of layers of different acoustic impedances. Energy absorption is modeled by a hysteresis loop, with sources of dissipation: hysteresis, structural and aerohydrodynamic. The coefficient of energy absorption is increased by fiber reinforcement, with the phases of destruction: pre-fracture, fractured and post-fracture. The aim is to simulate wave dynamics in 3D structures, to identify the advantages and disadvantages of enclosing structures constructed in an additive way compared to traditional monolithic products.

Keywords: multilayer structure, energy absorption, elastic waves, impedance, attenuation, fiber.

Введение

В современном мире, где растёт потребность в лёгких, прочных и многофункциональных материалах для защиты от механических воздействий, таких как удары, вибрации и взрывные волны, многослойные конструкции, изготовленные с помощью 3D-печати, представляют собой перспективное направление развития [1]. В частности, ауксетические структуры, обладающие отрицательным коэффициентом Пуассона, позволяют материалам расширяться в поперечном направлении при растяжении и сжиматься при сжатии, что значительно улучшает их способность к поглощению энергии и сопротивлению деформациям [2]. Такие свойства особенно ценны в отраслях, где требуется высокая ударная стойкость, включая аэрокосмическую промышленность, автомобилестроение, военную технику и биомедицину [3].

Технология 3D-печати, или аддитивного производства, революционизировала создание сложных геометрий, недоступных традиционными методами. Она позволяет точно контролировать микроструктуру, интегрировать армирующие элементы, такие как фибра, и создавать многослойные системы без значительных отходов материала. В контексте защитных конструкций это означает возможность разработки материалов, способных эффективно гасить упругие волны — колебания, которые распространяются в материале без необратимых деформаций, но могут вызывать разрушения при резонансе или накоплении энергии.

Актуальность темы обусловлена растущим спросом на материалы с улучшенными динамическими свойствами. В условиях современных вызовов, таких как террористические угрозы, природные катастрофы и промышленные аварии, защитные конструкции должны не только выдерживать статические нагрузки, но и эффективно рассеивать энергию динамических воздействий [4]. Исследования показывают, что многослойные конструкции, напечатанные на 3D-принтере, могут создавать зоны запрета для упругих волн, предотвращая их распространение в определённых частотных диапазонах. Это открывает пути для создания "умных" материалов, адаптируемых к конкретным угрозам.

Цель статьи — проанализировать физику прохождения упругих волн через многослойные 3D-печатные защитные конструкции.

С появлением 3D-печати в 2010-х годах стало возможным реализовывать сложные архитектуры [5]. Ранние исследования фокусировались на квазистатических свойствах 2D- и 3D-структур, но к 2020-м годам акцент сместился на динамические характеристики, включая распространение упругих волн [6]. Например, в 2020-х годах были разработаны эластичные метаматериалы с Koch-фрактальными структурами для управления волнами. Исторически, переход от натуральных к синтетическим материалам и от традиционного производства к аддитивному подчёркивает эволюцию от пассивных защитных систем к активным, адаптивным конструкциям [7].

3D-печать позволяет создавать материалы, где локальные резонансы сочетаются с структурными модами для широких границами запрета [8]. В защитных конструкциях добавление фибры (например, углеродной или стеклянной) усиливает вязкоупругие свойства, повышая коэффициент потерь. Для упругих волн такие материалы обеспечивают изоляцию, предотвращая резонансные разрушения.

Многослойные 3D-печатные конструкции важны для защиты, где они поглощают энергию ударов и вибраций. Например, ауксетические сэндвич-панели превосходят традиционные структуры, поглощая на 28% больше энергии от взрывов и снижая деформации при баллистических ударах. Примеры: двойные стреловидные структуры для баллистики и круговые для анти-взрывной защиты [9].

Теоретические основы энергопоглощения многослойной конструкции

Энергопоглощение — это фундаментальный параметр, характеризующий способность материала или конструкции рассеивать кинетическую энергию внешних воздействий без потери несущей способности или полного разрушения. В расчётах ограждающих

конструкций (стены, перегородки, фасады, барьеры), оно учитывается как ключевой фактор обеспечения безопасности, долговечности и экономической эффективности [10]. Ограждающие элементы не только разделяют пространство и защищают от внешней среды, но и служат первым барьером против динамических нагрузок, где традиционные расчёты на статическую прочность (по СП 63.13330.2018) недостаточны. Игнорирование энергопоглощения приводит к недооценке рисков: конструкция может выдерживать статическую нагрузку, но разрушиться под импульсным воздействием, вызывая цепную реакцию повреждений.

Из работ Сорокина Е.С. известно, что сообщенная материалу при нагрузке работа деформации возвращается при разгрузке не полностью. Часть механической работы, затраченная на неупругие деформации и поглощаемая материалом необратимо, измеряется петлей гистерезиса (Рис. 1) [11].

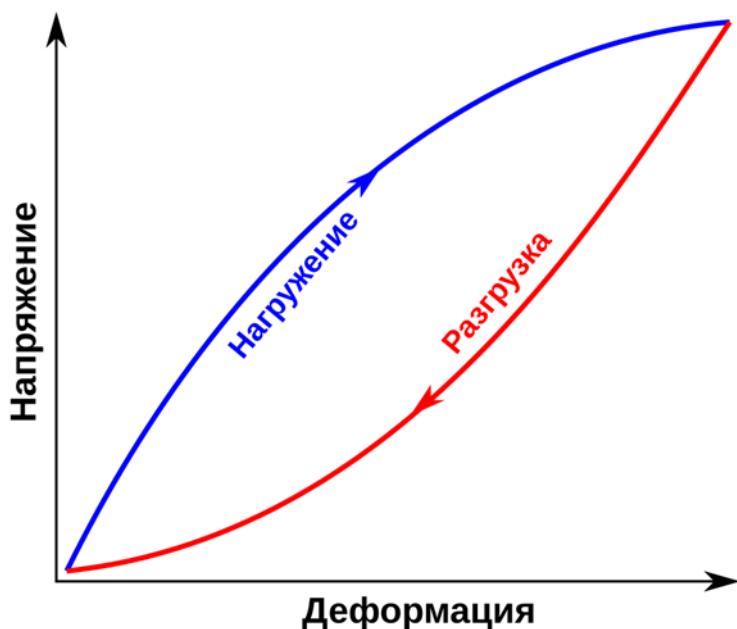


Рис. 1. Петля гистерезиса

Основные источники потерь энергии при механических колебаниях можно разделить на следующие три группы: рассеяние энергии в материале за счет его несовершенной упругости, или так называемые потери энергии в материале гистерезисного типа; рассеяние энергии на трение в углах сочленения колебательной системы, т.е. так называемое конструкционное рассеяние энергии, и рассеяние энергии за счет потерь в окружающую среду как подвижную, так и неподвижную или аэрогидродинамические потери энергии [12].

Упругие волны представляют собой механические колебания, которые распространяются в твердых телах, вызывая временные деформации без необратимых изменений в структуре материала. Эти волны возникают при приложении внешних сил, таких как удары, вибрации или сейсмическая активность, и играют ключевую роль в динамическом поведении материалов. В контексте многослойных защитных конструкций, напечатанных на 3D-принтере, понимание физики прохождения упругих волн критически важно для выработки систем, способных гасить вибрации, поглощать энергию и предотвращать разрушения [13]. Такие конструкции, позволяют манипулировать волнами через зоны запрета, где волны затухают, обеспечивая повышенную стойкость к динамическим нагрузкам, изоляции и акустического контроля в защитных приложениях.

Упругие волны включают продольные (сжатия-растяжения) и поперечные (сдвиговые) волны, скорость которых определяется плотностью и модулем упругости:

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга,
 ρ — плотность.

Упругие волны классифицируются по типу деформации: продольные (P-волны), где колебания происходят вдоль направления распространения, вызывая сжатие и растяжение; поперечные (S-волны), где колебания перпендикулярны направлению; и поверхностные волны, такие как волны Рэлея, которые распространяются по границе материала [14]. Скорость распространения зависит от свойств среды: для продольных волн:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга,
 ν — коэффициент Пуассона,
 ρ — плотность;

для поперечных:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3).$$

В многослойных структурах волны взаимодействуют с границами слоёв, вызывая отражения и преломления из-за несоответствия акустических импедансов [15].

Отражение волны на границах — это фундаментальное явление в волновой механике, возникающее при взаимодействии волны (акустической, электромагнитной, упругой или любой другой) с границей раздела двух сред с разными физическими свойствами. Это происходит, когда волна, распространяющаяся в одной среде, достигает границы раздела и частично отражается обратно, а частично преломляется (переходит) в другую среду. Отражение приводит к интерференции, стоячим волнам или потере энергии, что критично для приложений в акустике, сейсмологии, материаловедении и защитных конструкциях [16].

Физическая причина отражения — несоответствие акустических (или механических) импедансов сред. Импеданс Z — это сопротивление среды распространению волны, определяемое как:

$$Z = \rho c, \quad (4)$$

где ρ — плотность,
 c — скорость волны в среде.

Переход к неоднородным, многослойным средам усложняет картину. В таких структурах волны взаимодействуют с границами слоев, где несоответствие акустических импедансов приводит к отражениям и преломлениям. Коэффициент отражения:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (5)$$

преломления:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

где индексы 1 и 2 обозначают слои. В многослойных системах, волны демонстрируют анизотропию из-за инфилл-структур, где скорость и ослабление волны зависят от направления распространения [17].

Если импедансы равны ($Z_1 = Z_2$), волна проходит без отражения ($R=0$). При различии волн "замечает" границу, и часть энергии отражается, аналогично тому, как свет отражается от зеркала или звук от стены.

Представьте упругую волну (например, продольную Р-волну), распространяющуюся в твёрдой среде (слой 1 с Z_1). На границе со средой 2 (Z_2) волна вызывает локальные деформации: частицы в первой среде "толкают" вторую, но из-за разницы импедансов часть импульса возвращается обратно. Это аналогично столкновению шариков разной массы: лёгкий шарик, ударяя о тяжёлый, отскакивает [18].

Для открытой границы (свободная поверхность, $Z_2=0$, как воздух): волна полностью отражается с инверсией фазы (амплитуда меняет знак), так как импеданс воздуха пренебрежимо мал. Это вызывает спллинг (отслоение) в конструкциях под ударом.

Для фиксированной границы ($Z_2 > Z_1$): отражение без инверсии, волна "отскакивает" как от стены.

В многослойных конструкциях отражения на каждой границе накапливаются, вызывая интерференцию: конструктивная усиливает волну, деструктивная — гасит, создавая аттенюацию [19].

Аттенюация — ключевой механизм защиты, где энергия волны преобразуется в тепло или рассеивается. В многослойных материалах, в частности 3D-печатных структурах, она достигается через микроструктурные нестабильности. В ауксетических материалах аттенюация усиливается синкластическим поведением, где деформация распределяется равномерно, поглощая энергию на 100–200% больше, чем в обычных материалах [20].

Изготовление многослойных конструкций с помощью 3D-печати (Рис. 2) представляет собой инновационный подход, позволяющий создавать сложные архитектуры с контролируемыми свойствами, такими как прочность, гибкость и энергопоглощение [21]. Эти конструкции часто основаны на принципах, где слои с разными материалами или геометриями интегрируются для достижения уникальных механических характеристик. Процесс включает подготовку цифровой модели, выбор материалов, печать слой за слоем и пост-обработку. В отличие от традиционных методов, таких как литьё или механообработка, 3D-печать обеспечивает высокую точность и минимизирует отходы, что особенно важно для защитных структур, предназначенных для поглощения ударов или вибраций [22].

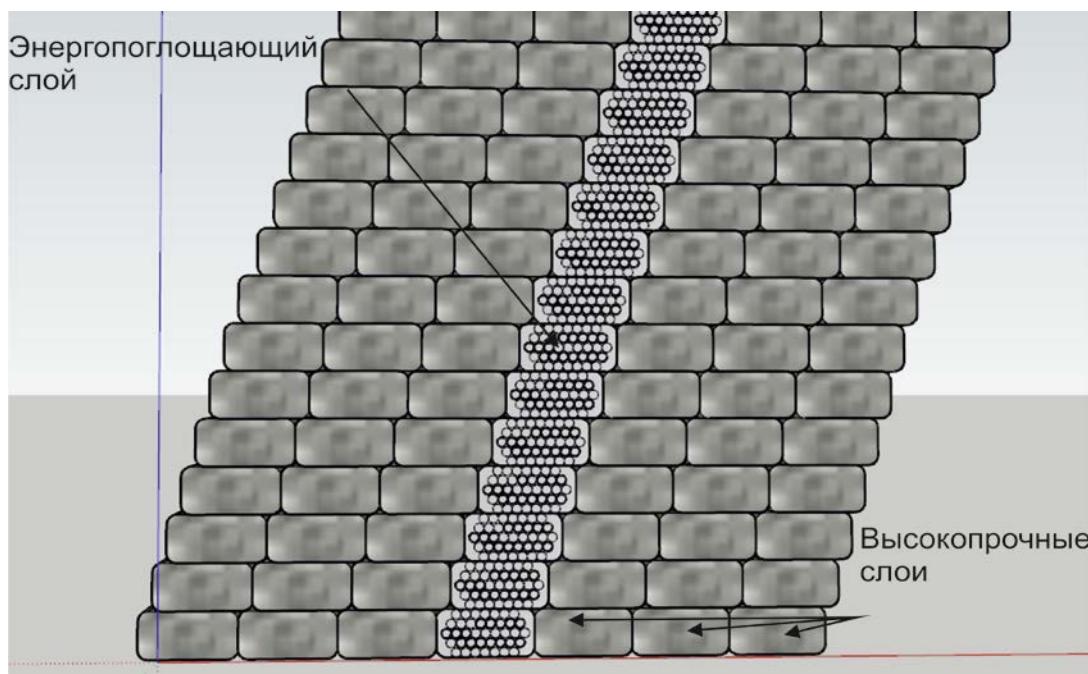


Рис. 2. Многослойная конструкция, напечатанная на 3D принтере

Согласно обзору современных достижений, 3D-печать позволяет фабриковать материалы с иерархическими структурами, включая многослойные решётки и оригами-подобные дизайны, которые могут быть адаптированы для защитных применений [23].

Например, в процессах, ориентированных на механические метаматериалы, акцент делается на создании периодических структур, где каждый слой способствует общим свойствам, таким как отрицательный коэффициент Пуассона или зоны запрета для волн.

Для периодических структур, применяется теория Блоха-Флоке, где дисперсионные кривые показывают зоны пропускания и запрета [24]. В зонах запрета волны экспоненциально затухают, что достигается через Брэгговское рассеяние или локальные резонансы [25].

Физика упругих волн в таких конструкциях обеспечивает основу для инновационных защитных систем, комбинируя аттенюацию, зоны запрета и аномальные свойства [26].

Энергопоглощающая способность ограждающей конструкции, армированной фиброй

В условиях динамических нагрузок, включая ударные воздействия (от транспортных средств, обвалов или взрывов), сейсмическую активность или даже высокоскоростные деформации от промышленных процессов, энергопоглощающая способность становится определяющим фактором выживания конструкции. Эта способность характеризует объём энергии, который материал или структура может рассеять без необратимого разрушения, измеряемый в единицах Дж/м³ или специфической энергии поглощения в Дж/г, и напрямую влияет на безопасность людей и имущества [27].

Добавление фибры в слои усиливает аттенюацию, распределяя напряжения и предотвращая трещины. В 3D-печатных ауксетических структурах фибра повышает энергопоглощение на 50–130%.

Армирование фиброй в бетонных ограждающих конструкциях — это метод микро- и макроуровневого усиления, где короткие волокна (диаметр 0,1–1 мм, длина 3–60 мм) равномерно распределяются в бетонной матрице для повышения трещиностойкости и пластичности. В отличие от традиционного армирования стальными прутьями, фибра обеспечивает трёхмерное распределение нагрузок, предотвращая локальные трещины и повышая посттрещиновую прочность. Наличие фибры может увеличить энергопоглощающую способность на 100–300% по сравнению с обычным бетоном, особенно под динамическими нагрузками, где коэффициент динамического усиления достигает 1,5–2,0 [28].

Энергопоглощение в ограждающих конструкциях — это многостадийный процесс, зависящий от микроструктуры материала и геометрии элемента. В обычном бетоне (без армирования) энергия поглощается преимущественно за счёт эластичной деформации (до 0,1–0,2% деформации) и последующего хрупкого разрушения, с специфической энергии поглощения около 1–5 кДж/м³ под статической нагрузкой и до 10 кДж/м³ под динамической. Разрушение происходит внезапно: трещины распространяются со скоростью 100–1000 м/с, приводя к потере несущей способности.

Фиброармирование вводит новые механизмы, делая процесс постепенным:

1. Предтрещиновая фаза: Фибра повышает предельную прочность на растяжение на 20–50%, задерживая образование микротрещин. Энергия рассеивается через вязкоупругие потери в матрице и на интерфейсе фибра-матрица.

2. Трещиновая фаза: Волокна "мостят" трещины, перенося нагрузку через трение и адгезию. Это увеличивает длину трещин и площадь разрушения, повышая вязкость.

3. Посттрещиновая фаза: Фибра обеспечивает остаточную прочность 20–50% от пиковой, позволяя конструкции выдерживать дополнительные деформации.

4. Динамическая диссипация: Под высокоскоростными нагрузками фибра снижает коэффициент динамического усиления для растяжения (1,2–1,5 вместо 2–4 для бетона), повышая специфической энергии поглощения на 150–250%.

В ограждающих конструкциях (панели 100–500 мм толщиной) фибра особенно эффективна против импульсных нагрузок, где энергия распределяется по объёму, предотвращая локальный прорыв.

Тип фибры определяет доминирующие механизмы: металлические фибры усиливают жёсткость, полимерные — вязкость, натуральные — экологичность. Эксперименты 2020–2025 годов показывают:

1. Стальные фибры

Стальные волокна (диаметр 0,5–1 мм, длина 30–60 мм) наиболее эффективны для динамического сжатия. В бетонах со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками с 2% содержанием стальной фибры специфическая энергия поглощения под ударом растёт на 200%, коэффициент рассеяния энергии — до 0,9, ударная вязкость при сжатии: +50–100% к, но коррозия снижает долговечность на 20–30% в агрессивных средах. Например, в панелях под взрывом (1–5 МПа) сталь повышает специфическую энергию поглощения с 8 кДж/м³ до 24 кДж/м³ [29].

2. Полимерные фибры

Полипропиленовые фибры (с содержанием в общем объеме 0,5–1%) улучшают поглощение энергии при растяжении на 100–150%, благодаря низкой плотности и высокой эластичности (модуль 3–10 ГПа), показатель ударной вязкости растёт на 150%, специфическая энергия поглощения — до 15 кДж/м³ [30].

3. Базальтовые и гибридные фибры

Базальтовые фибры (с содержанием в общем объеме 0,5–1,5%) балансируют: специфическая энергия поглощения +70–120%, коррозионностойкость как у стекла. Гибридные (стальная и полимерная фибра, 1% + 0,5%) дают синергию: специфическая энергия поглощения +216%, пластичность +43%. Тесты на гибридных фибробетонах с базальтовой фиброй показывают коэффициент рассеяния энергии 0,85 под скоростью деформации 10³ с⁻¹.

Сравнительный анализ энергопоглощения материалов с различными типом фибры представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ энергопоглощения материалов с различными типом фибры

Тип фибры	Специфическая энергия поглощения, (кДж/м ³)	Увеличение, (%)	Коэффициент рассеяния энергии
Без фибры	5–10	-	0,3–0,5
Стальная	15–30	+200–300	0,8–0,9
Полимерная	12–20	+120–200	0,6–0,8
Базальтовая	10–18	+100–180	0,7–0,85
Гибридная	20–35	+300–400	0,9–0,95

Таким образом, фибра увеличивает специфическую энергию поглощения ограждающих конструкций на 100–300%, делая их пластичными и ударостойкими.

Выводы

Энергопоглощающая способность многослойных защитных конструкций, напечатанных на 3D-принтере, представляет собой ключевой аспект их функциональности, определяющий способность материалов и структур преобразовывать кинетическую энергию ударов, вибраций или волн в другие формы энергии, такие как тепло, пластическая деформация или внутренние потери, без полного разрушения. В контексте 3D-печатных материалов и ауксетических структур эта способность усиливается за счет многослойного дизайна, где чередование слоев с разными плотностями, жесткостью и микроструктурами позволяет оптимизировать поглощение. Такие конструкции, демонстрируют превосходные

свойства по сравнению с монолитными материалами, достигая специфической энергии поглощения при низкой плотности. Это особенно важно для защитных применений, включая баллистическую защиту, виброзоляцию и сейсмостойкость, где требуется минимизировать передачу энергии на защищаемый объект.

Энергопоглощение в таких структурах происходит через несколько механизмов: эластическая и пластическая деформация, изгиб, фрикционные потери, резонансные эффекты и вязкоупругие диссипации. В многослойных системах слои могут быть функционально градиентными, где внешние слои обеспечивают жесткость, а внутренние — амортизацию, что приводит к контролируемому распределению энергии. Добавление фибры или наночастиц в слои усиливает эти свойства, повышая вязкость на 50–130% и предотвращая распространение трещин. В защитных свойствах это проявляется в способности выдерживать низкоскоростные удары, взрывные волны и вибрации, делая конструкции подходящими для защитной ограждающей конструкции.

Несмотря на преимущества, существуют ограничения:

1. ванизотропия 3D-печатных слоёв может привести к неравномерному распространению волн, особенно в направлениях, перпендикулярных печати, что требует дополнительной оптимизации дизайна;
2. высокая стоимость оборудования и материалов ограничивает масштабирование, хотя цены снижаются с развитием технологий;
3. интеграция фибры может вызвать проблемы с реологией смеси, снижая печатаемость и равномерность распределения, что влияет на энергопоглощение.
4. отсутствие стандартов для тестирования динамических свойств и потенциальную деградацию под экстремальными условиями, такими как высокие температуры или коррозия.

Эти ограничения подчёркивают необходимость дополнительного исследований в области материаловедения и моделирования для повышения надежности.

В заключение, многослойные защитные конструкции, напечатанные на 3D-принтере, представляют собой прорыв в материаловедении, объединяя аддитивное производство и передовую физику волн для создания материалов будущего. Они не только повышают безопасность и эффективность, но и открывают пути к устойчивым инновациям. По мере преодоления текущих ограничений эти технологии трансформируют защитные системы, делая их умнее, легче и адаптивнее. Это подчеркивает важность междисциплинарных подходов для решения глобальных вызовов, где наука и инженерия сливаются для создания более безопасного мира.

Список литературы

1. Bertoldi K. Harnessing instabilities to design tunable architected cellular materials // Annual Review of Materials Research. 2017. Vol. 47. P. 51–70.
2. Jiang Y., Li Y. 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical properties // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. P. 101412.
3. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D-printed polymeric cellular structures with negative Poisson's ratio // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 30. P. 100886.
4. Hussein M.I., Leamy M. J., Ruzzene M. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress and future outlook // Applied Mechanics Reviews. 2014. Vol. 66. No. 4. P. 040802. <https://doi.org/10.1115/1.4026911>
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196.
6. Matlack K.H. et al. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency vibration absorption // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 113. – No. 30. – P. 8386–8390.
7. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48. – No. 6. – P. 1031–1055.

8. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials: Negative refraction, imaging, lensing and cloaking // Springer Series in Materials Science. – 2013. – Vol. 166. – 378 p.
9. Jiang Y., Li Y. Auxetic materials for energy absorption // Materials & Design. – 2021. – Vol. 204. – P. 109661.
10. Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2008. – Vol. 6. – No. 3. – P. 403–430.
11. Сорокин Е.С. Механические потери в упругих материалах // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1965. – № 4. – С. 45–52.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
13. Auriault J.-L. et al. Wave propagation in heterogeneous media // Springer. – 2009. – 276 p.
14. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. – New York: Wiley, 1973. – Vol. 1. – 425 p.
15. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. – New York: Academic Press, 1980. – 556 p.
16. Kinsler L.E. et al. Fundamentals of acoustics. – New York: Wiley, 2000. – 4th ed. – 576 p.
17. Torrent D., Sánchez-Dehesa J. Anisotropic mass density by gradient-index transformation // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – P. 053026.
18. Graff K.F. Wave motion in elastic solids. – New York: Dover, 1991. – 546 p.
19. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – P. 040802.
20. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review // Smart Materials and Structures. – 2018. – Vol. 27. – No. 3. – P. 033001.
21. Zhang Q. et al. 3D printed auxetic structures for protective applications // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 49. – P. 102482.
22. Ambrosi A., Pumera M. 3D-printing technologies for unfilled thermoplastic composites // Chemical Society Reviews. – 2016. – Vol. 45. – No. 23. – P. 6331–6351.
23. Maconachie T. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Materials & Design. – 2019. – Vol. 183. – P. 108137.
24. Brillouin L. Wave propagation in periodic structures: Electric filters and crystal lattices. – New York: McGraw-Hill, 1946. – 246 p.
25. Kittel C. Introduction to solid state physics. – New York: Wiley, 2005. – 8th ed. – 704 p.
26. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials. – Dordrecht: Springer, 2013. – 378 p.
27. Yoo J.H. et al. Energy absorption characteristics of fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 278. – P. 122392.
28. Yoo J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on the dynamic properties of fiber-reinforced concrete // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 152. – P. 106659.
29. Zhou J. et al. Dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under impact loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 269. – P. 121244.
30. Yoo D.Y., Banthia N. Mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Cement and Concrete Composites. – 2020. – Vol. 114. – P. 103757.

References

1. Bertoldi K. Harnessing instabilities to design tunable architected cellular materials // Annual Review of Materials Research. – 2017. – Vol. 47. – P. 51–70.
2. Jiang Y., Li Y. 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical properties // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 36. – P. 101412.
3. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D-printed polymeric cellular structures with negative Poisson's ratio // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 30. – P. 100886.
4. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress and future outlook // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – No. 4. – P. 040802.
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196.

6. Matlack K.H. et al. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency vibration absorption // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 113. – No. 30. – P. 8386–8390.
7. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48. – No. 6. – P. 1031–1055.
8. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials: Negative refraction, imaging, lensing and cloaking // Springer Series in Materials Science. – 2013. – Vol. 166. – 378 p.
9. Jiang Y., Li Y. Auxetic materials for energy absorption // Materials & Design. – 2021. – Vol. 204. – P. 109661.
10. Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2008. – Vol. 6. – No. 3. – P. 403–430.
11. Sorokin, E. S., Mechanical losses in elastic materials, Izvestiya AN SSSR. Solid state mechanics. 1965, No. 4, pp. 45-52.
12. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity], Moscow: Nauka Publ., 1987, 232 p.
13. Auriault J.-L. et al. Wave propagation in heterogeneous media // Springer. – 2009. – 276 p.
14. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. – New York: Wiley, 1973. – Vol. 1. – 425 p.
15. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. – New York: Academic Press, 1980. – 556 p.
16. Kinsler L.E. et al. Fundamentals of acoustics. – New York: Wiley, 2000. – 4th ed. – 576 p.
17. Torrent D., Sánchez-Dehesa J. Anisotropic mass density by gradient-index transformation // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – P. 053026.
18. Graff K.F. Wave motion in elastic solids. – New York: Dover, 1991. – 546 p.
19. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – P. 040802.
20. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review // Smart Materials and Structures. – 2018. – Vol. 27. – No. 3. – P. 033001.
21. Zhang Q. et al. 3D printed auxetic structures for protective applications // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 49. – P. 102482.
22. Ambrosi A., Pumera M. 3D-printing technologies for unfilled thermoplastic composites // Chemical Society Reviews. – 2016. – Vol. 45. – No. 23. – P. 6331–6351.
23. Maconachie T. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Materials & Design. – 2019. – Vol. 183. – P. 108137.
24. Brillouin L. Wave propagation in periodic structures: Electric filters and crystal lattices. – New York: McGraw-Hill, 1946. – 246 p.
25. Kittel C. Introduction to solid state physics. – New York: Wiley, 2005. – 8th ed. – 704 p.
26. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials. – Dordrecht: Springer, 2013. – 378 p.
27. Yoo J.H. et al. Energy absorption characteristics of fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 278. – P. 122392.
28. Yoo J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on the dynamic properties of fiber-reinforced concrete // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 152. – P. 106659.
29. Zhou J. et al. Dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under impact loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 269. – P. 121244.
30. Yoo D.Y., Bantia N. Mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Cement and Concrete Composites. – 2020. – Vol. 114. – P. 103757.

Жаростойкий пенобетон с радиационно-защитными свойствами

УДК 691.327

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0023>

Номер статьи: С0023

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

amsychova@yandex.ru

Титова Тамила Семеновна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
первый проректор — проректор по научной работе, зав. кафедрой «Техносферная и
экологическая безопасность»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1558-5811

titova@pgups.ru

Майер Виктория Александровна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
ассистент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4024-0449

vmaier@pgups.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. В условиях развития атомной энергетики возрастаёт потребность в строительных материалах нового поколения, способных одновременно выполнять функции тепловой и радиационной защиты при сниженной массе и улучшенных эксплуатационных характеристиках. Настоящая работа посвящена разработке методики синтеза жаростойкого пенобетона с комплексом радиационно-защитных и теплофизических свойств, ориентированной на применение в ограждающих и технологических конструкциях ядерно-энергетических установок. Показано, что сочетание функционализированной пены с тяжёлыми наполнителями и водосодержащими компонентами может обеспечивать ослабление γ - и нейтронного излучения при одновременном снижении теплопроводности и плотности материала.

Ключевые слова: пенобетон, жаростойкость, радиационная защита, теплозащитные свойства, строительные материалы, атомная энергетика.

Heat-resistant foam concrete with radiation-shielding properties

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia
amsychova@yandex.ru

Titova Tamila Semenovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
First Vice-Rector - Vice-Rector for Research, Head of the Department of Technosphere and
Environmental Safety
Saint Petersburg, Russia
titova@pgups.ru

Maier Viktoriia Alexandrovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
assistant
Saint Petersburg, Russia
vmaier@pgups.ru

Abstract. In the context of the development of nuclear power engineering, there is an increasing demand for next-generation building materials capable of simultaneously providing thermal and radiation protection while maintaining reduced weight and improved performance characteristics. This study is devoted to the development of a synthesis methodology for heat-resistant foam concrete that combines radiation-shielding and thermophysical properties, intended for use in enclosure and technological structures of nuclear power facilities. It is demonstrated that the combination of functionalized foam with heavy fillers and water-containing components can ensure attenuation of γ - and neutron radiation while simultaneously reducing the thermal conductivity and density of the material.

Keywords: foam concrete, heat resistance, radiation shielding, thermal insulation properties, building materials, nuclear power engineering.

Введение

Современные сооружения атомной энергетики и объекты с повышенной радиационной нагрузкой требуют материалов, совмещающих низкую теплопроводность, жаростойкость и эффективную радиационную защиту при минимальной массе. Традиционные тяжёлые радиационно-защитные бетоны (на барите, магнетите, оксидах тяжёлых металлов) обеспечивают высокий уровень ослабления гамма- и нейтронного излучения, но их высокая плотность (2200 – 3500 кг/м³) резко увеличивает массу и конструктивные нагрузки, а также усложняет монтаж и эксплуатацию [1 – 4]. В противоположность этому, пенобетон (600 – 900 кг/м³) имеет выгодные теплофизические характеристики, однако в исходном виде обладает недостаточной радиационной стойкостью для применения в ядерной технике. Поэтому задача создать многофункциональный пенобетон, сохраняющий низкую плотность и одновременно выполняющий радиационно-защитную функцию остаётся актуальной и технологически значимой.

Основная гипотеза настоящего исследования заключается в том, что выполнение радиационно-защитной функции материалом с пониженной плотностью возможно, если

необходимые компоненты вводятся не только через цементный камень, но и через пенную плёнку, которая является наиболее плотной частью структуры и играет ключевую роль в формировании свойств, поскольку суммарный объём пленочной фазы в пенобетонной матрице велик. Усиление и стабилизация этой пленки позволяет нивелировать присутствие воздуха, повысить плотность локальных зон и тем самым улучшить как тепловые, так и радиационные характеристики материала.

Защитный эффект будет достигаться не только за счет толщины слоя материала, но и за счет его структуры. Плотность мы снижаем, но за счет качественной, стабилизированной и уплотнённой пенной пленки. Методический подход к разработке радиационно-защитного пенобетона основан на интеграции двух научно-технических решений:

1. Модификация структуры пенной пленки. Введение наночастиц алюминия, кремния и оксида висмута в оболочку газовых пузырьков позволяет увеличить плотность пленки и создать барьер для гамма-излучения. Одновременно использование водосодержащих полимеров и бора повышает эффективность замедления и поглощения нейтронов.

2. Сочетание каменного каркаса и функционализированной пены. Каменный каркас бетона насыщается тяжёлыми минералами и гидросиликатами кальция, обеспечивающими классическую γ -защиту (Рис. 1).

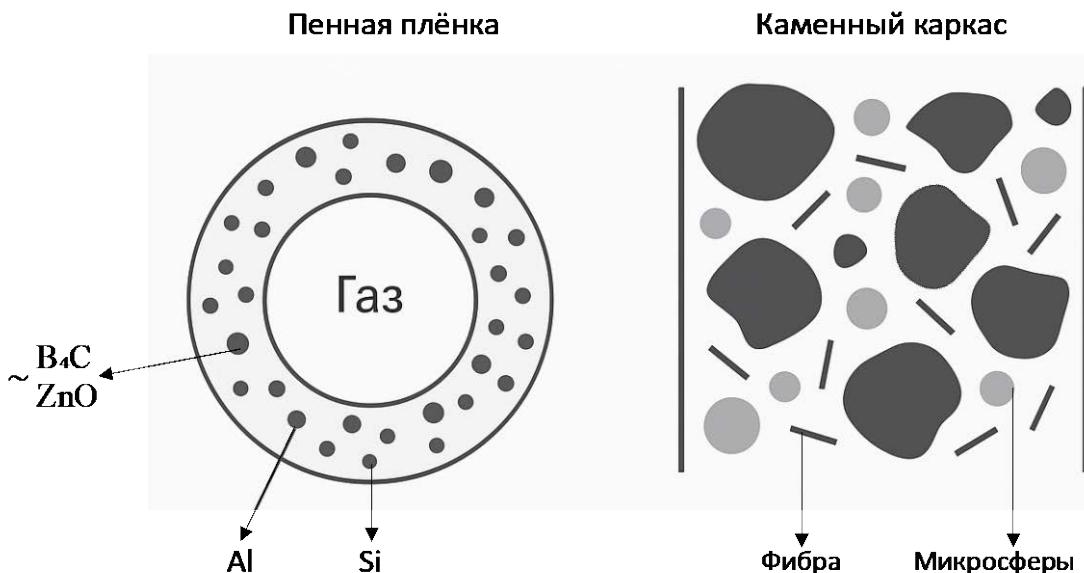


Рис. 1. Модификация состава пенобетона

В качестве базовой матрицы рассматривается смесь на основе портландцемента с различными добавками (наполнителями и заполнителями) с плотностью 600–900 кг/м³.

Объект исследования: жаростойкий пенобетон средней плотности.

Предмет исследования: радиационно-защитные, теплофизические и физико-химические свойства жаростойкого пенобетона.

Материалы и методы

Анализ литературы и подходов к созданию радиационно-защитных материалов

Для обеспечения комплексной радиационной и тепловой защиты разработка материалов должна опираться на междисциплинарный подход, объединяющий химию материалов, физику излучения и строительную инженерию. При этом важным становится не только подбор состава, но и управление структурой наnano- уровнях.

Одним из ключевых факторов, определяющих требования к радиационно-защитным материалам, является энергия и проникающая способность различных видов

ионизирующего излучения. Эти характеристики напрямую связаны с выбором химического состава материала. Для понимания принципов ослабления и поглощения ионизирующих излучений целесообразно рассмотреть физическую природу различных типов излучения и диапазон их энергий (Таблица 1) [5].

Таблица 1
Виды ионизирующего излучения

Класс	Вид излучения	Частицы / природа	Частота f / длина волны λ	Средняя энергия	Проникающая способность в бетоне
Электромагнитное	Радио	фотоны	$f = 3 \times 10^3 - 3 \times 10^9$ Гц; $\lambda \approx 10^2 - 10^5$ м	$10^{-9} - 10^{-3}$ эВ	ММ-СМ
	Микроволны		$f = 3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$ Гц; $\lambda \approx 1 - 0.001$ м	$10^{-3} - 10^{-1}$ эВ	ММ-СМ
	Инфракрасное		$f = 3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$ Гц; $\lambda \approx 10^{-3} - 10^{-6}$ м	0.001-1 эВ	~ММ (поверхностное поглощение)
	Видимый свет		$f = 4 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$ Гц; $\lambda \approx 4 \times 10^{-7} - 7,5 \times 10^{-7}$ м	1.65-3.1 эВ	ММ-СМ (почти не проникает в бетон)
	УФ		$f = 7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$ Гц; $\lambda \approx 1 - 4 \times 10^{-8}$ м	3-124 эВ	ММ (поверхностное поглощение)
	Рентген		$f = 3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц; $\lambda \approx 10^{-10} - 10^{-12}$ м	0.1-1 МэВ	~СМ
	Гамма		$f > 3 \times 10^{19}$ Гц; $\lambda < 10^{-12}$ м	0.1-10 МэВ	~СМ-десятки СМ
Корпускулярное	Альфа	${}^2\text{He}^{2+}$ (2p + 2n)	-	4-8 МэВ	микрометры
	Бета	e^- / e^+		0.1-3 МэВ	ММ-СМ
	Нейтроны	n^0		0.025 эВ (тепловые) - 10 МэВ (быстрые)	десятки СМ - метры

На основе анализа таблицы видно, что эффективная защита достигается сочетанием высокого атомного номера элементов для гамма-излучения и водород-/борсодержащих фаз для нейтронного поглощения.

Современные подходы к модификации материалов для защиты от излучения

Исследования показывают, что радиационная защита материалов определяется не только химическим составом, но иnanoструктурой.

Исследование [6] посвящено созданию пенобетонного композита с улучшенными характеристиками поглощения электромагнитных волн. В качестве матрицы использован пенобетон, в который введены наполнители: феррит и углеродное волокно. Авторы отмечают, что добавление феррита ухудшает механические свойства материала, однако приводит к более однородному распределению пор и, как следствие, к улучшению

поглощающей способности. Добавление всего 0,3 мас.% углеродного волокна повышало прочность на сжатие и изгиб соответственно на около 10,9 % и 24,5 %. В частотном диапазоне 2-18 ГГц минимальный коэффициент отражения достиг $-27,2$ дБ при толщине образца 8,7 мм и резонансной частоте 15,84 ГГц; эффективная полоса поглощения составила 1,44 ГГц. Авторы делают вывод о синергетическом эффекте феррита и углеродного волокна.

В статье [7] предложена модификация пенобетона при помощи графита и углеродного волокна. В качестве цементной основы был использован сульфоалюминатный цемент 42,5, водоцементное отношение 0,5, плотность около 600 кг/м³. Волокно длиной 3 мм и диаметром 7 мм вводилось в количестве 0,6 мас.%, графит размером ~ 23 мм до ~ 2 мас.%. Изучены гидратация, микроструктура, пористость и электромагнитные параметры. Добавление углеродного волокна повышало долю пор размером менее 200 мм и усиливало изгибную прочность стенового материала; графит же нивелировал замедление гидратации, вызванное волокном, но увеличение содержания графита выше ~ 2 мас.% не оказывало значительного влияния на проводимость. Наибольшая эффективность поглощения отмечена при толщине 6 мм, когда эффективно поглощалась полоса около 2,5 ГГц (потери на отражение < -10 дБ). При толщине 8 мм и 10 мм диапазон снижался до $\sim 1,4$ ГГц и $\sim 0,9$ ГГц соответственно. Авторы делают вывод, что комбинированное введение графита и углеродного волокна значительно повышает электромагнитное поглощение пенобетона при малой толщине.

Обе статьи демонстрируют, что пенобетон можно эффективно модифицировать для задачи поглощения электромагнитных волн, так как введение функциональных наполнителей приводит значительному снижению характеристики поглощения электромагнитных волн (дБ), расширению эффективной полосы поглощения (ГГц). Они дают основу для разработки пенобетонов с встроенными тяжёлыми фазами.

Авторы [8] исследовали пуролиуретан-пену, как лёгкий материал для защиты от ионизирующего излучения. В матрицу полимера введены наполнители: NiO, ZnO, Cr₂O₃, MnO₂, BaO(Fe₂O₃)₆ и шлам — общий объём загрузки до ≈ 44.5 мас.%. С помощью симуляций и программного обеспечения оценивалось ослабление γ -лучей (0.015–15 МэВ) и быстрых нейтронов (до ~ 11 МэВ) в этих композитах. Было показано, что введение наполнителей с высоким атомным номером значительно повышает линейный коэффициент ослабления для γ -лучей на низких энергиях. При этом чистая пена обеспечивает хорошую модерацию быстрых нейтронов благодаря наличию лёгких элементов (водород, углерод) в материале. Авторы делают вывод, что материал с наполнителями представляет собой перспективный лёгкий экранный материал для γ - и нейтронной защиты, особенно в приложениях с ограничением массы, конструкций малого веса и формируемых панелей.

Сопоставимые по природе оксидные фазы ранее вводились в цементную матрицу для ускорения твердения при пониженных и отрицательных температурах, где они продемонстрировали не только химико-технологическую совместимость с цементом, но и статистически значимый прирост прочности по сравнению с контрольным (бездобавочным) составом, что подтверждает возможность их применения в качестве функциональных радиационно-защитных и одновременно упрочняющих компонентов в пенобетонной структуре [9].

В работе [10] рассматривались композиционные металлические пены с разными размерами пустот и высоко Z-элементами (вольфрам, ванадий). По сравнению с чистым свинцом эффективность была чуть ниже, но с преимуществами по весу и переработке. Материалы показали хорошие характеристики по γ -лучам и нейтронам, ведь добавление высоко Z-элементов улучшало защиту, сохраняя низкую плотность и хорошие механические свойства.

На основании этих публикаций можно сделать вывод о том, что использование пенистых или пористых конструкций доказательно перспективно для радиационной защиты. Полимерная пеноматрица с высокой загрузкой тяжёлыми наполнителями показывает улучшение γ -защиты; металлические пены с высоко Z-элементами

демонстрируют улучшения в ослаблении рентгеновского, γ - и нейтронного излучения при существенно меньшей массе.

Таким образом, современные исследования направлены на поиск компромисса между плотностью и защитной эффективностью. Сводка ключевых подходов приведена в Таблице 2.

Таблица 2
Современные методы повышения радиационной стойкости бетонов

Метод / технология	Механизм и физико-химическая сущность	Ключевые технические параметры	Основной эффект для радиационной защиты	Дополнительные эффекты
Добавление тяжёлых оксидов (Bi_2O_3 , PbO , WO_3)	Увеличение коэффициента ослабления γ -квантов за счёт фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Повышение эффективного атомного номера материала.	- Размер частиц <100 нм; - Содержание 3–10 % по массе; - Введение в цементную матрицу или пенную плёнку.	Увеличение ослабления γ -излучения на 30–50 % Снижение необходимой толщины материала	Незначительное увеличение плотности
Борсодержащие добавки (B_4C , BN , PVA-B)	Поглощение тепловых нейтронов за счёт большого сечения захвата. Совместное использование с водородсодержащим и фазами обеспечивает замедление и поглощение.	- Содержание 2–5 %; - Размер частиц: 0,5–20 мкм; - Введение в матрицу или пенную плёнку.	Повышение эффективности захвата нейтронов в 1,5–2 раза	Незначительное снижение прочности
Золь-гель модификация пенной плёнки (SiO_2 , Al_2O_3)	Формирование неорганической сетки (Si-O-Si , Al-O-Si), уплотнение и стабилизация плёнки, снижение диффузии воздуха.	- Концентрация прекурсора: 3–7 % - Формирование геля в процессе вспенивания	Повышение плотности пенной плёнки Рост устойчивости к γ -излучению Снижение воздушной пористости	Повышение прочности и термостойкости

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Для обоснования выбора компонентов и структуры разработанного материала рассмотрены основные физические процессы взаимодействия γ -квантов и нейтронов. Основные физические механизмы ослабления ионизирующего излучения [11] включают:

- Фотоэффект – полное поглощение γ -кванта и выбивание электрона с внутреннего энергетического уровня (эффективен при низких энергиях $<0,1$ МэВ).
- Комптоновское рассеяние – взаимодействие γ -кванта с слабо связанным электроном и потеря части энергии (0,1–2 МэВ).
- Образование электронно-позитронных пар – преобразование высокоэнергетического γ -кванта ($>1,02$ МэВ) в пару частиц.
- Упругое рассеяние нейтронов – передача кинетической энергии лёгким ядрам (эффективно при близкой массе нейтрона и ядра водорода).
- Поглощение тепловых нейтронов – захват замедленного нейтрона ядром с последующей ядерной реакцией (эффективно для бора, кадмия, лития).

Энергия тепловых волн и нейтронного излучения сопоставима по масштабу ($\sim 0,01$ – $0,1$ эВ), что открывает возможность их совместного подавления [12, 13]. Предполагается следующая модель замедления:

1. Быстрые нейтроны (1–20 МэВ) многократно рассеиваются на водородсодержащих полимерах.

2. При переходе в тепловой диапазон ($\sim 0,025$ эВ) они захватываются B_4C и Li .

3. Остаточная энергия поглощается структурой материала через тепловые колебания, обеспечивая дополнительную защиту.

На основании рассмотренных физических механизмов возникает вопрос о том, как именно такие воздействия отражаются на ключевых связующих фазах цементного камня — гидросиликатах кальция, формирующих прочностной каркас структуры бетона. В последние годы опубликован ряд экспериментальных работ [14, 15], посвящённых γ -облучению образцов C-S-H с различной степенью основности, в которых исследовались структурные, химические и механические изменения под действием ионизирующего излучения.

Экспериментальные данные по γ -облучению гидросиликатов кальция с разным отношением Ca/Si (то есть от низкоосновных с $\text{C/S} \approx 0,75$, у которых силикатные цепи длинные и хорошо сшитые, до более высокоосновных с $\text{C/S} \approx 1,33$ и выше, у которых цепи короче и межслойное пространство более кальций-насыщено) показывают, что в диапазоне доз до $\approx 0,8$ МГр не наблюдается критически опасных химико-структурных изменений ни в одном из типов C-S-H. Не происходит дегидратации межслоя, не меняется общее содержание связанной воды, не изменяется локальное отношение Ca/Si , не нарушается морфология нанопластинчатых агрегатов, не укорачиваются силикатные цепи на уровне тетраэдров SiO_4 .

Это означает, что и низкоосновные, и более высокоосновные гидросиликаты кальция химически и nanoструктурно устойчивы к облучению γ -квантами в этом диапазоне доз.

Однако долговечность биологической защиты реактора критична не только в первые десятилетия, но и на горизонте 60 – 80 лет эксплуатации [16], то есть при суммарных дозах γ -излучения порядка десятков и сотен МГр в прикорпусной зоне. На таких дозах режим поведения C-S-H меняется принципиально. Показано, что при облучении до десятков–сотен МГр происходит радиационно-индуцированная дегидратация межслоя, когда базальное расстояние между слоями C-S-H уменьшается примерно на несколько десятых, фиксируется потеря межслоевой воды и рост доли фиксированных гидроксильных групп за счёт перестройки ближнего окружения кальция и кремния. Это сопровождается увеличением модуля Юнга и одновременным снижением ползучести, измеренной методами наноиндентации и длительного удержания нагрузки. Иными словами, при высоких дозах γ -облучения C-S-H становится более жёстким, менее вязкоупругим и хуже способен расслаблять напряжения.

При этом расчётный срок службы демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 установлен около 30 лет⁹, что согласуется с традиционной практикой вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. В этих условиях суммарная дозовая нагрузка на защитные цементные конструкции не достигает диапазона, при котором наблюдается критическая потеря вязкоупругих характеристик цементного камня. Это позволяет утверждать, что для рассматриваемого конструкционного срока службы сохранение работоспособности цементной компоненты пенобетона, в том числе её способности перераспределять и релаксировать напряжения, является обеспеченным.

Гидросиликаты кальция можно считать радиационно-стойкими по химической структуре, но подверженными радиационно-механическому упрочнению и потере релаксационной способности при дозах выше 10^7 – 10^8 Гр. Это важно учитывать при

⁹ Фишман Р. Новое слово в энергетике: зачем России нужен атомный реактор с замыканием топливного цикла // TechInsider. 20.01.2022. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/800463-novoe-slovo-v-energetike-zachem-rossii-nuzhen-atomnyy-reaktor-s-zamykaniem-toplivnogo-cikla/>

проектировании цементных композитов для ядерной энергетики, ведь устойчивость С–S–Н к разрушению не гарантирует сохранения их вязкоупругих свойств.

Результаты и обсуждение

Экспоненциальная модель ослабления γ -излучения

Для количественной оценки эффективности экранирования ионизирующего излучения материалами на цементной основе были рассмотрены классические инженерные экспоненциальные модели затухания:

- экспоненциальная модель для γ -излучения (характеризует, насколько сильно материал ослабляет поток γ -излучения на единицу толщины: чем больше μ , тем материал тяжелее в смысле радиационной защиты) (1);
- модель поглощения тепловых нейтронов (определяет, какая доля нейтронов поглощается в единичном слое толщины: чем больше Σ , тем эффективнее материал для нейтронной защиты) (2).

Рассмотрены тяжёлые радиационно-защитные бетоны, традиционно применяемые в ядерных установок [1, 17, 18]. Их моделирование позволяет оценить закономерности ослабления γ - и нейтронного излучения в зависимости от плотности, химического состава и толщины слоя, а также параметры, характеризующие способность материала к поглощению энергии ионизирующего излучения. Такой подход важен, поскольку тяжёлые бетоны служат моделью радиационной защиты. Однако при проектировании новых материалов необходимо понимать, насколько изменение структуры влияет на экранирующую способность.

Результаты моделирования приведены на Рис. 2.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$P = 1 - e^{-\Sigma x} \quad (2)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления γ -излучения ($1/\text{см}$);
 Σ — макроскопический коэффициент поглощения нейтронов ($1/\text{см}$);
 I — интенсивность прошедшего γ -излучения;
 I_0 — начальная интенсивность;
 P — вероятность захвата нейтрона;
 x — толщина слоя материала (см).

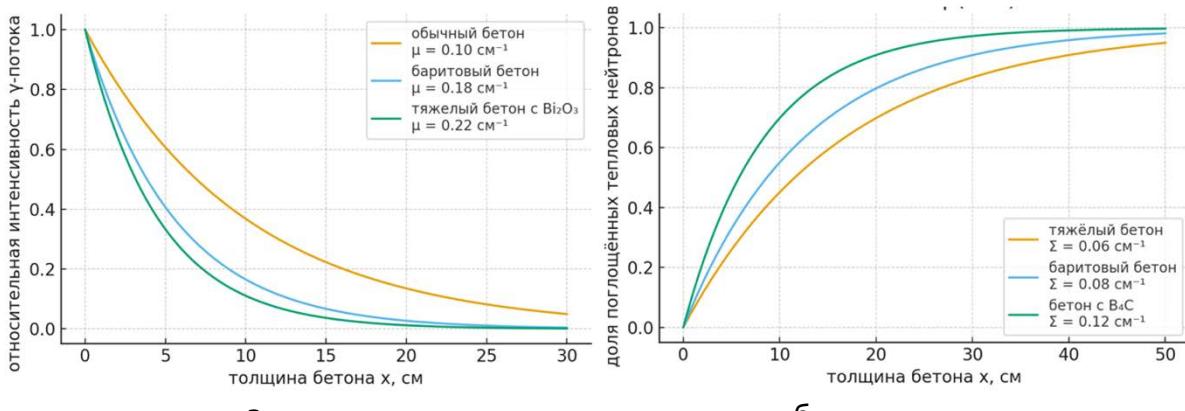


Рис. 2. Эффективность радиационной защиты тяжелого бетона:
а — ослабление гамма-излучения, б — поглощение тепловых нейтронов

На графике (а) показано, как уменьшается относительная интенсивность γ -излучения с ростом толщины слоя бетона при разных значениях μ . На графике (б) показано, как растёт доля поглощенных нейтронов с увеличением толщины слоя при разных значениях Σ . Для бетона без бора требуется толщина порядка 40–50 см, чтобы поглотить $\sim 90\%$ тепловых

нейтронов. Для бетона с добавками бора примерно та же степень защиты достигается уже при толщине порядка 20 см.

Таким образом, эффективный радиационно-защитный бетон для ядерной энергетики должен быть не просто тяжёлым, а композиционно функционализированным. Это напрямую согласуется с предложенной в работе концепцией многоуровневого материала, в котором минерализованный каркас насыщается тяжёлыми фазами; стабилизированная пенная плёнка дополняется борсодержащими и водородсодержащими компонентами. Именно такое сочетание позволяет одновременно уменьшить толщину защитного слоя и снизить массу конструкции, что критично для ограждающих и навесных элементов в ядерно-энергетических установках.

Для подтверждения возможности функционализации пенной структуры в аналогичных системах рассмотрен пример пенобетона, модифицированного углеродными материалами (Рис. 3).

Ранее мы рассмотрели, что одним из перспективных направлений пенобетонов является приданье им способности поглощать электромагнитное излучение [7, 8, 19]. Введение графита и углеродных волокон не только повышает электропроводность пенной плёнки, но и расширяет диапазон эффективного поглощения.

Авторы проводили измерения отражательной способности материала в диапазоне 2–18 ГГц для образцов различной толщины (6, 8 и 10 мм). Эффективной считается область, где уровень отражения $RL < -10$ дБ, что соответствует поглощению более 90 % падающей мощности электромагнитной волны. Ширина этих интервалов (0,8–2,5 ГГц) использована на графике для анализа зависимости эффективной полосы поглощения от толщины образца.

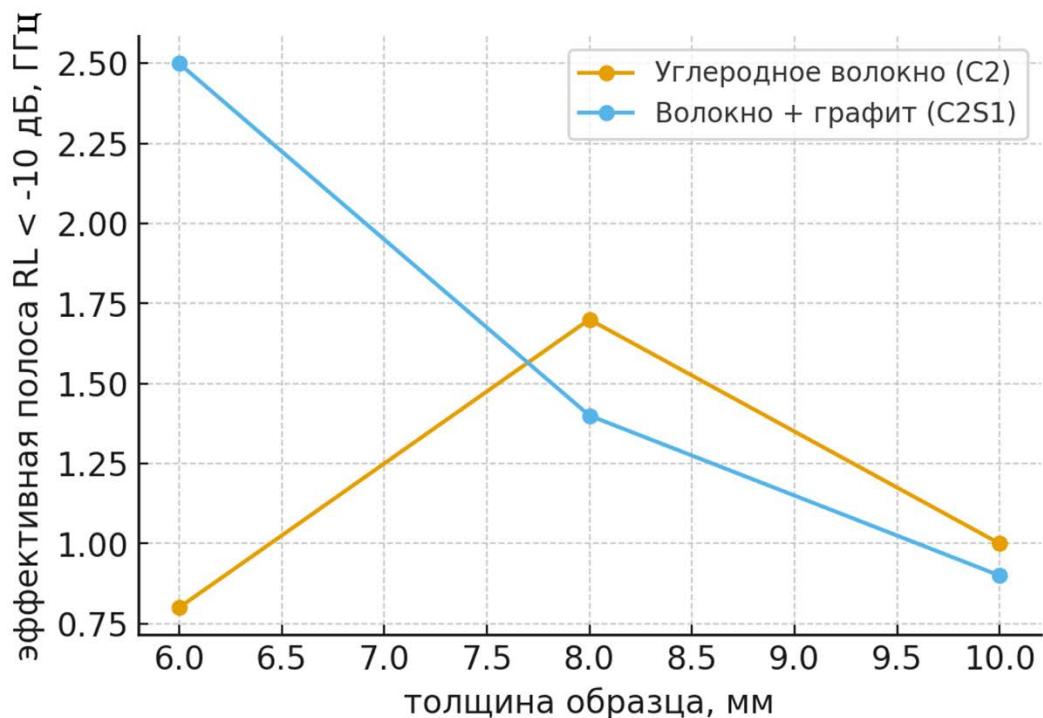


Рис.3. Эффективная полоса поглощения от толщины образца

Такое поведение подтверждает ключевую идею работы, когда пенная структура бетона может быть использована для управления взаимодействием с излучением, что делает возможным создание многослойных радиационно-защитных материалов нового поколения.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что эффективная радиационная защита может быть достигнута не только за счёт увеличения плотности материала. Переход к

пенобетонам демонстрирует возможность альтернативного подхода — использования пористой структуры и добавок для управления взаимодействием материала с излучением. Проведённый анализ и моделирование показали, что:

- Эффективность γ -экранирования определяется линейным коэффициентом ослабления μ , зависящим от плотности и атомного состава материала.
- Защита от тепловых нейтронов обеспечивается фазами с высоким коэффициентом поглощения Σ . Добавление борсодержащих компонентов позволяет достичь эквивалентной эффективности при вдвое меньшей толщине слоя.
- Комбинированное увеличение μ и Σ в одном материале возможно при одновременной интеграции тяжёлых и борсодержащих фаз.

Анализ подтвердил, что изменение состава пенной плёнки существенно расширяет диапазон эффективного поглощения электромагнитного излучения, демонстрируя потенциал пенной структуры.

Таким образом, пенобетонная матрица может быть целенаправленно модифицирована для формирования комплексной защиты от γ - и нейтронного излучения без увеличения плотности и массы материала.

Список литературы

1. Ahmad, N. et al. Idris, M.I., Hussin, A. et al. Enhancing shielding efficiency of ordinary and barite concrete in radiation shielding utilizations / N. Ahmad, M. I. Idris, A. Hussin, J. A. Karim, N. M. Azreen, R. Zainon // Scientific Reports. 2024. V. 14. 26029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76402-0>
2. Новиков Н. В., Самченко С. В., Окольникова Г. Э. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2020. №1.
3. Карнаухов, А. А. Радиационно-устойчивый бетон на основе модифицированного гидрида титана и высокоглиноземистого цемента // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019. № 6. С. 68-73.
4. Казанская, Л. Ф., Майер В. А., Сибгатуллин Э. С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 4. С. 931-943. DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. EDN GXVSEW.
5. Сычева, А. М., Майер В. А., Арзамасцев А. А. Жаростойкий пенобетон с радиационно-защитной функцией // Распределенная энергетика сегодня. Материалы, технологии и устройства : Сборник тезисов докладов третьей молодежной научной конференции, Екатеринбург, 23 мая 2025 года. Екатеринбург, 2025. С. 39-41. EDN EDRQTF.
6. Bai, Y.-H., Zhang, D.-Y., & Lu, Y. Foamed concrete composites: Mn-Zn ferrite/carbon fiber synergy enhances electromagnetic wave absorption performance // Construction and Building Materials. 2023. V. 49, I. 21. <https://doi.org/10.1016/j.cem.2023.08.058>
7. Tu, Q., Liu, J., Wang, J., Li, Y., & Zhang, H. Preparation of a novel foamed concrete modified with graphite and carbon fiber: Mechanical, electromagnetic and microstructural characteristics based on X-CT // Construction and Building Materials. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31665>.
8. Oraby, H., Hegazy, G. E., ElTalawy, S. M., & Nabil, I. M. (2025). Polyurethane-based foam composites: synthesis, structural characteristics, and radiation shielding properties. // Scientific Reports. 15. 12227. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95497-7>
9. Сычева А. М. Добавки некоторых новых типов для твердения цементных смесей при пониженных и отрицательных температурах : дис. канд. техн. наук : 05.23.05. Санкт-Петербург, 2000. 203 с.
10. Chen S., Bourham M., Rabiei A. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. // Radiation Physics & Chemistry. 2015. Vol. 117. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>

11. Васильева А. В., Рыжова В. А., Васильев А. С. Визуализация источников гаммаизлучения с использованием сцинтилляционного метода и кодирующей апертуры // Приборостроение. 2019. №1.
12. Васильев Г. А. Водородсодержащие материалы для атомной энергетики // МНИЖ. 2014. №11-2 (30).
13. Палеха В. А., Гетьман А. А. Бор. Свойства и применение в ядерной энергетике // Литьё и металлургия. 2017. №3 (88).
14. Tajuelo Rodriguez E., Hunnicutt W. A., Mondal P., Le Pape Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // Journal of the American Ceramic Society. 2019. Vol. 102, No. 11. P. 6511–6525. <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
15. Baral A. et al. , Ultra-high gamma irradiation of calcium silicate hydrates: Impact on mechanical properties, nanostructure, and atomic environments / A. Baral, Rodriguez E. Tajuelo, W. A. Hunnicutt, E. Cakmak, H. Sun, J. Ilavsky, Y. Le Pape, T. M. Rosseel, N. Garg // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 147. P. 106508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106855>
16. Esselman, T. Expected condition of concrete exposed to radiation at age 80 years of reactor operation. May. 2018. <https://doi.org/10.2172/1468217>
17. Badarloo, B., Lehner, P., Bakhtiari Doost, R. Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates // Materials. – 2022. T. 15, № 6. 2173. <https://doi.org/10.3390/ma15062173>
18. Singh, V., Kumar, P., Patel, R., Tariq, M. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and challenges // Case Studies in Construction Materials. 2024. T. 21. e02684. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800>
19. Bian, P. et al. Investigation on the electromagnetic wave absorption properties of foamed concrete / P. Bian, B. Zhan, P. Gao, Q. Yu, Y. Yang, L. Hong, W. Zhang // SSRN Electronic Journal. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4206638>

References

1. Ahmad, N. et al. Idris, M.I., Hussin, A. et al. Enhancing shielding efficiency of ordinary and barite concrete in radiation shielding utilizations / N. Ahmad, M. I. Idris, A. Hussin, J. A. Karim, N. M. Azreen, R. Zainon // Scientific Reports. 2024. V. 14. 26029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76402-0>
2. Novikov, N. V., Samchenko, S. V., Okolnikova, G. E. Barite-containing radiation-shielding building materials // RUDN Journal of Engineering Researches. 2020. No. 1.
3. Karnaughov, A. A. Radiation-resistant concrete based on modified titanium hydride and high-alumina cement // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. — 2019. — No. 6. — Pp. 68–73.
4. Kazanskaya, L. F. Interrelation of factors determining durability of concrete / L. F. Kazanskaya, V. A. Maier, E. S. Sibgatullin // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2024. - Vol. 21, No. 4. - P. 931-943. - DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. - EDN GXVSEW.
5. Sycheva, A. M., Maier, V. A., Arzamastsev, A. A. Heat-resistant foam concrete with radiation-shielding function // Distributed Energy Today: Materials, Technologies and Devices. Proceedings of the 3rd Youth Scientific Conference, Yekaterinburg, May 23, 2025. Yekaterinburg, 2025. Pp. 39-41. EDN: EDROTF.
6. Bai, Y.-H., Zhang, D.-Y., & Lu, Y. Foamed concrete composites: Mn–Zn ferrite/carbon fiber synergy enhances electromagnetic wave absorption performance // Construction and Building Materials. 2023. V. 49, I. 21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.08.058>
7. Tu, Q., Liu, J., Wang, J., Li, Y., & Zhang, H. Preparation of a novel foamed concrete modified with graphite and carbon fiber: Mechanical, electromagnetic and microstructural characteristics based on X-CT // Construction and Building Materials. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.e31665>

8. Oraby, H., Hegazy, G. E., ElTalawy, S. M., & Nabil, I. M. (2025). Polyurethane-based foam composites: synthesis, structural characteristics, and radiation shielding properties. // *Scientific Reports*. 15. 12227. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95497-7>
9. Sychyova A. M. Additives of Certain New Types for the Hardening of Cement Mixtures at Low and Subzero Temperatures: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences (05.23.05). Saint Petersburg, 2000. 203 p.
10. Chen S., Bourham M., Rabiei A. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. // *Radiation Physics & Chemistry*. 2015. Vol. 117. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>
11. Vasiliev, G. A. Hydrogen-containing materials for nuclear power engineering // *International Research Journal*. — 2014. — No. 11-2 (30).
12. Palekha, V. A., Getman, A. A. Boron: properties and applications in nuclear energy // *Foundry and Metallurgy*. — 2017. — No. 3 (88).
13. Tajuelo Rodriguez, E., Hunnicutt, W. A., Mondal, P., Le Pape, Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102, No. 11. Pp. 6511–6525. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
14. Tajuelo Rodriguez E., Hunnicutt W. A., Mondal P., Le Pape Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102, No. 11. P. 6511–6525. <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
15. Baral A. et al. , Ultra-high gamma irradiation of calcium silicate hydrates: Impact on mechanical properties, nanostructure, and atomic environments / A. Baral, Rodriguez E. Tajuelo, W. A. Hunnicutt, E. Cakmak, H. Sun, J. Ilavsky, Y. Le Pape, T. M. Rosseel, N. Garg // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 147. P. 106508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106855>
16. Esselman, T. Expected condition of concrete exposed to radiation at age 80 years of reactor operation. May. 2018. <https://doi.org/10.2172/1468217>
17. Badarloo, B., Lehner, P., Bakhtiari Doost, R. Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates // *Materials*. – 2022. T. 15, № 6. 2173. <https://doi.org/10.3390/ma15062173>
18. Singh, V., Kumar, P., Patel, R., Tariq, M. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and challenges // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. T. 21. e02684. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800>
19. Bian, P. et al. Investigation on the electromagnetic wave absorption properties of foamed concrete / P. Bian, B. Zhan, P. Gao, Q. Yu, Y. Yang, L. Hong, W. Zhang // *SSRN Electronic Journal*. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4206638>

Синтез жаростойкого пенобетона на основе портландцемента для применения в конструкциях объектов специального строительства

УДК 691.3

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0024>

Номер статьи: C0024

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Почетный работник высшего профессионального образования РФ,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

amsychova@yandex.ru

Рябова Светлана Сергеевна

канд. техн. наук,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
ст. преподаватель каф. «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2583-2155

slanaryabova@mail.ru

Статья получена: 31.10.2025. Одобрена: 18.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Разработан жаростойкий пенобетон на основе портландцемента для применения в объектах специального строительства. Проведение целенаправленного синтеза жаростойкого пенобетона основано на полном связывании портландита в термостойкие фазы за счет введения тонкомолотых керамических добавок. Полученный материал соответствует заданным физико-механическим характеристикам: марка по средней плотности D700, класс по прочности на сжатие B1,5, класс по предельно допустимой температуре применения И6 (600 °C) и теплопроводность 0,15 Вт/(м·°C). Уникальным свойством является отрицательный коэффициент температурного расширения, обеспечивающий материалу компенсацию температурных деформаций металлоконструкций без разрушения. Образование термостойких фаз подтверждено физико-химическими методами анализа (ДТА и РФА).

Ключевые слова: жаростойкий пенобетон, портландцемент, отрицательный коэффициент температурного расширения, термостойкие фазы.

Synthesis of refractory foam concrete based on Portland cement for use in structures of special construction facilities

Anastasia Maximovna Sycheva

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation,

St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Head of the Department

"Building Materials and Technologies",

St. Petersburg, Russia

amsychova@yandex.ru

Ryabova Svetlana Sergeevna

Candidate of Technical Sciences,

St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Senior Lecturer,

Department of "Building Materials and Technologies",

St. Petersburg, Russia

slanaryabova@mail.ru

Abstract. Refractory foam concrete based on Portland cement has been developed for use in special construction facilities. The targeted synthesis of heat-resistant foam concrete is based on the complete binding of portlandite into heat-resistant phases due to the introduction of finely ground ceramic additives. The resulting material meets the specified physical and mechanical characteristics: grade D700 for average density, compressive strength class B 1.5, maximum permissible application temperature class I6 (600 °C) and thermal conductivity 0.15 W/(m·°C). A unique property is the negative coefficient of thermal expansion, which provides the material with compensation for thermal deformations of metal structures without destruction. The formation of heat-resistant phases is confirmed by physico-chemical analysis methods (DTA and XFA).

Keywords: refractory foam concrete, Portland cement, negative coefficient of thermal expansion, heat-resistant phases.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью в создании новых жаростойких материалов для объектов, которые работают в условиях повышенных температур.

Современные объекты специального строительства требуют от теплоизоляционных материалов не только низкой теплопроводности, но и способности выдерживать длительный высокотемпературный нагрев без разрушения.

Ключевыми отраслями, где необходимо внедрение таких материалов, являются:

1. Ракетно-космическая отрасль. В этой сфере требуется создание долговечной облицовки газоходов, способной выдерживать высокотемпературное газодинамическое воздействие при старте ракет-носителей, поскольку существующие материалы значительно деградируют [1,2].
2. Второе — атомная энергетика. Необходимо создание нового жаростойкого материала с повышенными демпферными свойствами, в частности для конструкции обечайки промежуточной реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Решение этих задач и являлось целью данного исследования, которое заключается в создании нового жаростойкого пенобетона (ЖПБ) на основе портландцемента (ПЦ).

Целевые физико-механические свойства для ЖПБ на основе ПЦ

Для решения поставленной задачи необходимо было обеспечить ЖПБ ряд ключевых физико-механических характеристик (Таблица 1).

Таблица 1

Целевые физико-механические свойства для ЖПБ на основе ПЦ

№ п/п	Параметр	Значение
1	Марка по средней плотности	D700
2	Класс по прочности на сжатие	В1,5
3	Класс по предельно допустимой температуре применения	И6 (600°C)
4	Коэффициент теплопроводности	$\lambda =$ не более 0,2 Вт/(м·°C)
5	Коэффициент температурного расширения (КТР)	Отрицательное значение

Однако ключевой и наиболее сложной задачей было обеспечение совместной работы материалов в конструкции.

Дело в том, что при высокотемпературном воздействии металлические элементы конструкций расширяются. Чтобы компенсировать это расширение и предотвратить разрушение ЖПБ под действием температуры, он должен сжиматься.

Для достижения этого эффекта материал должен обладать отрицательным коэффициентом температурного расширения и повышенными деформативными свойствами.

Задача исследования

Из трудов таких ученых, как К. Д. Некрасов, М. Г. Масленникова и О. В. Болотникова, известно [3-5], что ключевой проблемой при создании жаростойких бетонов на ПЦ является портландит ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который образуется в результате гидратации цемента. При температуре около 585 °C он разлагается на CaO и воду, что и приводит к образованию трещин.

В пенобетонах эта проблема усиливается, поскольку в нём соотношение цемента к заполнителю составляет 2:1, в то время как в обычных бетонах — примерно 1:3.

Таким образом, цемента, а следовательно, и образующегося портландита, значительно больше.

Материалы и методы

В данной работе предложен новый подход, который позволит превратить этот недостаток — избыток ПЦ — в преимущество за счет его полного связывания в термостойкие фазы (Рис. 1).



Рис. 1. Схема перехода недостатка использования портландцемента в ЖПБ в его преимущество

Такие фазы обеспечат устойчивость к повышенным температурам не только портландцементному камню, но и ЖПБ на его основе.

Из анализа литературы таких ученых как М. М. Сычев, К. Д. Некрасов, М. Г. Масленникова и других известно [3, 4], что для процессов связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ необходимо использование тонкомолотых добавок, например, на основе SiO_2 .

Основная научная идея работы заключается в том, что необходимо подобрать такую природу тонкомолотой добавки, которая позволит связать весь избыточный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в термостойкие фазы. Температура разрушения термостойких фаз портландцементного камня представлена в Таблице 2.

Таблица 2

Температура разрушения термостойких фаз портландцементного камня

№ п/п	Фазы портландцементного камня	Название фазы портландцементного камня	$T, ^\circ\text{C}$
1	$\text{C}_4\text{S}_3\text{H}$	Фошагит	650–700
2	$\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$	Ксонотлит	775–800
3	$\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$	Гиролит	140–150; 700–780
4	$\text{C}_3\text{S}_{10}\text{H}_3$	Трускотит	600–700
5	$\text{C}_5\text{S}_2\text{H}$	Кальциевый хондродит	650–700

Из трудов научной школы профессора Сватовской Ларисы Борисовны известно [6], что для синтеза строительных материалов повышенного качества сырье можно рассматривать по значению энергетической характеристики его основного катиона — орбитальной электроотрицательности (ОЭО, χ , эВ) — чем выше это значение ОЭО (Таблица 3), тем более прочная связь образуется между сырьевыми компонентами.

Таблица 3

Энергетическая характеристика катиона сырья (ОЭО)

№	Катион металла (Me) сырьевого компонента	$OEO, \chi, эВ$	Вид сырья
1	Алюминий (Al^{3+})	6,01	Керамический кирпич, алюмосиликатные микросфера, шамотный порошок
2	Титан (Ti^{4+})	4,35	Титан-содержащее сырье
3	Магний (Mg^{2+})	2,42	Магний-содержащее сырье
4	Железо (Fe^{3+})	2,22	Железо-содержащее сырье

Из таблицы видно, что наибольшее значение этой величины соответствует катиону алюминия (6,01 эВ), который содержится в большом количестве в керамических материалах.

С учетом вышесказанного, в составе ЖПБ предложено использовать в качестве части тонкомолотой добавки керамический кирпич, в качестве части мелкого заполнителя — алюмосиликатные микросфера и молотый шамотный порошок.

На Рис. 2 представлена качественная схема, которая иллюстрирует связывание портландита с керамическими компонентами за счет образования между ними новой связи.



Рис. 2. Качественная схема образования новой связи между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и катионами керамического сырья

С целью подтверждения возможности прохождения таких процессов в пенобетоне был выполнен термодинамический расчет возможных реакций твердения ПЦ (Таблица 4, процессы 1, 4) и взаимодействия тонкомолотой добавки на основе SiO_2 с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (процессы 2, 3, 5).

Таблица 4
Термодинамический расчет образования термостойких фаз

<i>№</i>	<i>Катион металла (Me) сырьевого компонента</i>	<i>600 °C</i>	<i>Термостойкие фазы</i>
1	$2(\text{C}_3\text{S}) + 3\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_4\text{S}_3\text{H}_2 + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$	-160,16	$\text{C}_4\text{S}_3\text{H}$
2	$4\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{S}_6\text{H} + 3\text{H}_2\text{O}$	-339,47	
3	$6\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{S}_6\text{H} + 5\text{H}_2\text{O}$	-243,29	$\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$
4	$2(\text{C}_3\text{S}) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$	138,11	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
5	$2\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{SiO}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2 + 2,5\text{H}_2\text{O}$	-940,16	$\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$

Расчет производился в соответствии с третьим законом термодинамики и показал принципиальную возможность образования термостойких фаз в составе ЖПБ.

Результаты

В результате теоретического и экспериментального подбора состава, был получен состав ЖПБ на основе ПЦ, представленный в [1, 7]. С учетом поставленной задачи синтеза ЖПБ на основе ПЦ и научных основ были выбраны следующие компоненты:

1. Вяжущее — портландцемент;
2. С целью повышения долговечности, предложено использовать комплексную тонкомолотую добавку, включающую молотый гранулированный шлак и тонкомолотый кирпич марки М200. Аморфное строение этих компонентов способствует образованию термостойких фаз в составе ЖПБ.
3. Заполнители: песок дробленый породы диабаз, шамотный порошок (огнеупорные заполнители) и алюмосиликатные микросфера. Микросфера представляют собой полые шарики с гладкой поверхностью, заполненные внутри газом CO_2 . Использование микросфер позволяет снизить коэффициент теплопроводности ЖПБ. (коэффициентом теплопроводности $\sim 0,016 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{°C}$.)
4. Базальтовое фиброволокно с целью придания материалу необходимых демпферных свойств.

Поскольку в составе ЖПБ используются компоненты с высокой удельной поверхностью (тонкомолотый гранулированный шлак и тонкомолотый кирпич), то реологические характеристики пенобетонной смеси значительно ухудшаются. С целью

повышения растекаемости смеси предложено использовать комплексную добавку пластифицирующего действия [1, 7].

В качестве пенообразователя предложено использовать: пенообразователь на протеиновой.

Как видно из данных представленных в Таблице 5, основные физико-механические характеристики полученного ЖПБ полностью соответствуют целевым значениям, показанным в таблице 1, что подтверждает высказанные ранее предположения.

Таблица 5
Физико-механические свойства ЖПБ на основе ПЦ

<i>№ п/п</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
1	Марка по средней плотности	D700
2	Класс по прочности на сжатие	B1,5
3	Класс по предельно допустимой температуре применения (в соответствии с ГОСТ 20910)	И6 (600°C)
4	Остаточная прочность после прогрева	60%
5	Число воздушных теплосмен (в соответствии с ГОСТ 20910)	T20
6	Коэффициент теплопроводности	$\lambda = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$
7	Коэффициент температурного расширения (КТР)	минус $6,52 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при 100 °C; минус $18,30 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при 200 °C; минус $19,00 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при 300 °C; минус $22,07 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при 400 °C.

Для подтверждения образования термостойких фаз в составе ЖПБ были проведены физико-химические исследования образцов с помощью рентгенофазового, дериватографического и микроскопического анализов (Рис. 3).

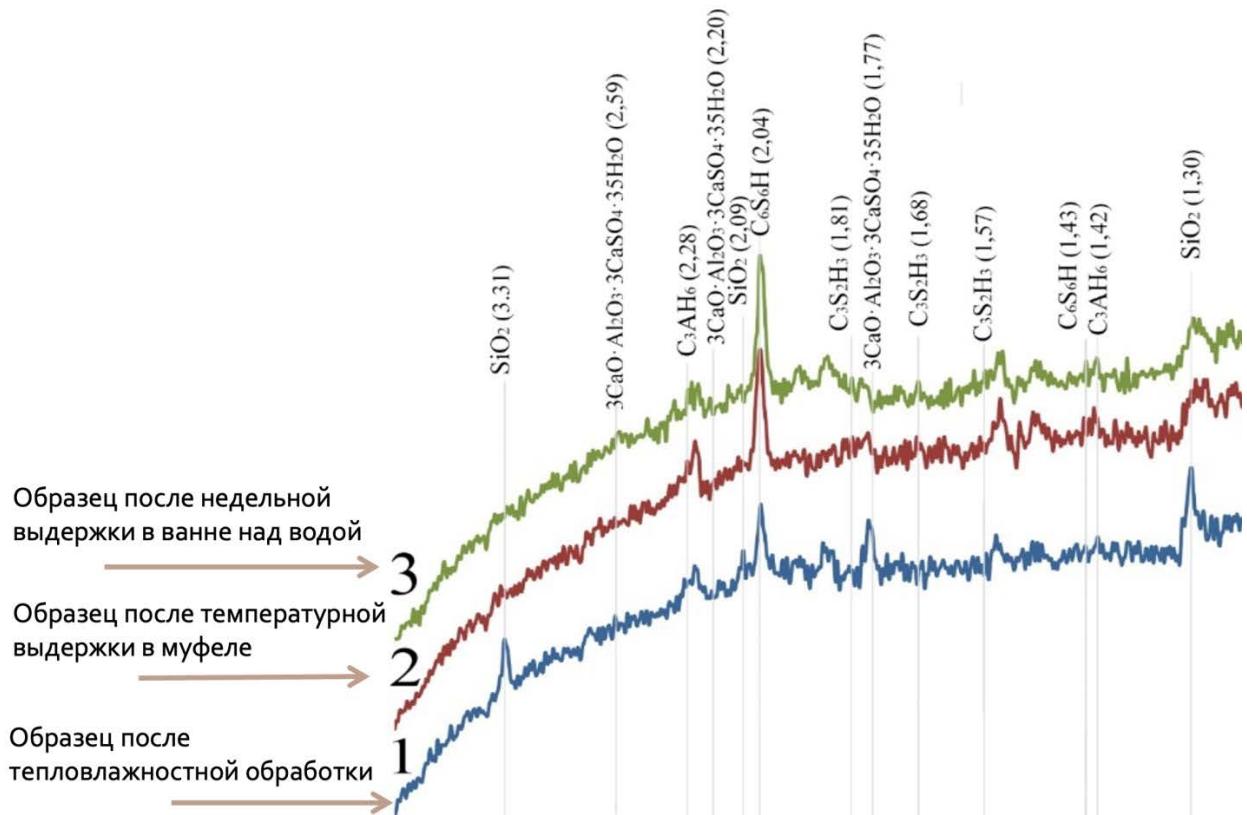


Рис. 3. Рентгенограммы образцов ЖПБ

Результаты рентгенофазового анализа показали наличие целевых термостойких фаз:

1. Ксонотлита (C₆S₆H);
2. Афвиллита (C₃S₂H₃);
3. Фошагита (C₄S₃H).

Полученные данные рентгено-фазового анализа нашли своё подтверждение в результатах дериватографического анализа (Рис. 4).

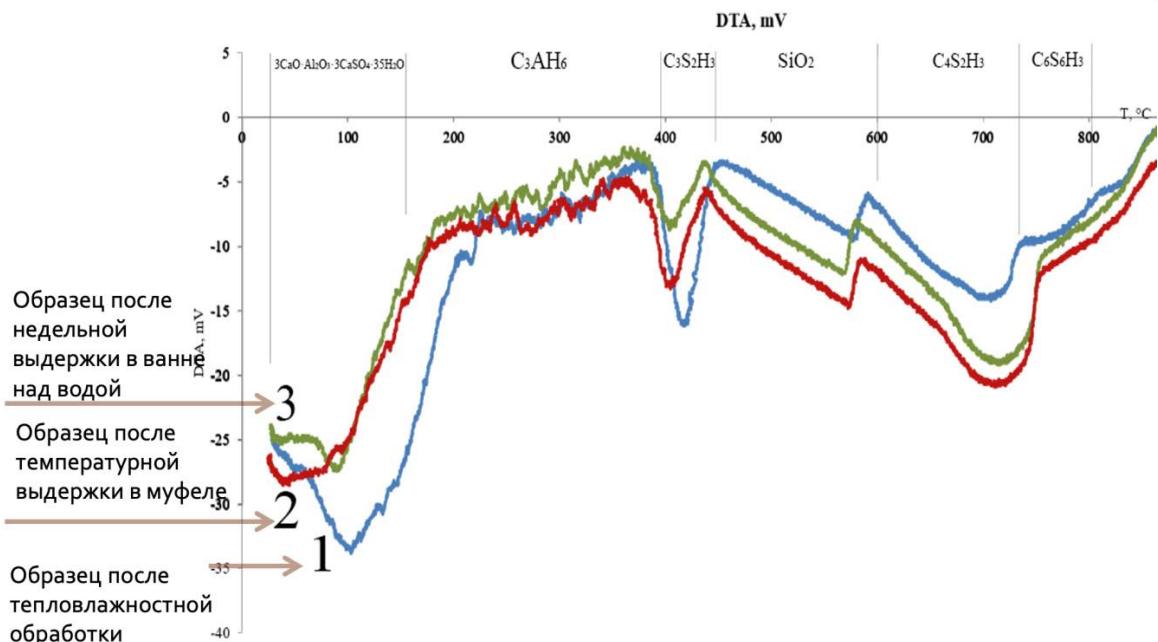


Рис. 4. Дериватограммы образцов ЖПБ

Проведённые физико-химические исследования показали отсутствие в образцах фазы портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Это позволяет утверждать, что он полностью прореагировал с компонентами комплексной тонкомолотой добавки и керамического сырья, перейдя в термостойкие фазы.

Таким образом, образование этих фаз и полное связывание портландита обеспечили полученному материалу достаточную прочность на сжатие и необходимую прочность после прогрева, что и определяет его долговечность в условиях эксплуатации при повышенных температурах.

Заключение

На основе полученного ЖПБ на ПЦ, были разработаны технические решения его применения в конструкции газохода универсального стартового комплекса «Ангара» вместо металлооблицовки [1, 7].

Такое техническое решение позволит повысить долговечность конструкции и увеличить срок ее эксплуатации.

В атомной энергетике жаростойкий пенобетон был рекомендован для применения в конструкции обечайки промежуточной реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Научная и практическая значимость работы подтверждена созданием нового материала, его успешным промышленным внедрением и комплексным исследованием свойств.

В рамках перспективных направлений планируется:

1. Углублённое исследование долговечности ЖПБ в атомной энергетике. Поскольку срок эксплуатации реактора составляет более 30 лет, то планируется изучение возможных твердофазных реакций в составе ЖПБ на основе ПЦ, которые предположительно могут протекать при длительном воздействии температуры. Основная цель — это возможное подтверждение образования новых керамических фаз в его составе, таких как муллит, анортит или ранкинит.
2. Расширение сфер применения для ЖПБ. Например:
 - в промышленном и гражданском строительстве — это футеровка дымовых и промышленных труб;
 - в авиационной отрасли — для создания демпфирующих полос на взлётно-посадочных полосах;
 - в транспортной инфраструктуре — в качестве энергопоглощающих элементов на высокоскоростных магистралях.

Список литературы

1. Гера, В. И. и др. Технические решения с применением жаростойкого пенобетона для конструкций газохода универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса «Ангара» / В.И. Гера, Д.Н. Гула, В.Г. Котович, С.С. Рябова, А.М. Сычева // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. Вып. 681. С. 141–146.
2. Головчинский В. О. и др. Определение коэффициента температурного линейного расширения жаростойкого пенобетона для применения в конструкциях газохода стартовых сооружений / В.О. Головчинский, Ю.А. Каменев, С.С. Рябова, А.С. Соломахин, А.М. Сычева // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. Вып. 684. С. 334–341.
3. Некрасов, К. Д., Тарасова, А. П. Жаростойкий бетон на портландцементе. М. : Стройиздат, 1969. 92 с.
4. Масленникова М. Г. Легкие жароупорные бетоны на портландцементе и на жидким стекле с керамзитовым и вермикулитовым заполнителями : автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. н. Акад. строительства и архитектуры СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона. Москва, 1963. 20 с.

5. Береговой В. А. и др. Жаростойкие пенобетоны: монография. Пенза : ПГУАС, 2007. 112 с.;
6. Термодинамический и электронный аспекты свойств композиционных материалов для строительства и экозащиты / Под науч. Ред. Л.Б. Сватовской. Санкт-Петербург: ОАО «Издательство Стройиздат СПб», 2004. 176 с., ил.
7. Sycheva, A. M., Ruabova, S. S., Pirogov, S. Yu., Pyzhov, S. I. Refractory Foam Concrete for Nuclear Power Engineering // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64. Pp. 38–45.

References

1. Gera, V. I. et al. Technical solutions using heat-resistant foam concrete for flue structures of the universal launch complex of the Angara space rocket complex / V. I. Gera, D. N. Gula, V. G. Kotovich, S. S. Ryabova, A. M. Sycheva // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2022. I. 681. Pp. 141-146.
2. Golovchinsky V. O. et al. Determination of the coefficient of temperature linear expansion of heat-resistant foam concrete for use in the structures of the launch tube // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2022. I. 684. pp. 334-341.
3. Nekrasov, K. D., Tarasova, A. P. Heat-resistant concrete on Portland cement. Moscow : Stroyizdat, 1969. 192 p.
4. Light heat-resistant concretes based on Portland cement and liquid glass with expanded clay and vermiculite fillers : abstract of the dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences / Acad. construction and architecture of the USSR. Scientific research. institute of Concrete and Reinforced concrete. Moscow, 1963. 20 p.
5. Beregovoy V. A. [et al.] Heat—resistant foam concrete: a monograph. Penza : PGUAS, 2007. 112 p.
6. Thermodynamic and electronic aspects of the properties of composite materials for construction and environmental protection / Under the scientific editorship of L.B. Svatovskaya. Saint Petersburg: Stroyizdat SPb Publishing House, 2004. 176 p.
7. Sycheva, A. M., Ruabova, S. S., Pirogov, S. Yu., Pyzhov, S. I. Refractory Foam Concrete for Nuclear Power Engineering // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64. Pp. 38–45.

Дорожный бетон нового поколения — интеграция самоуплотнения и повышенной физико-механической стойкости

УДК 691.542

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0025>

Номер статьи: C0025

Титова Тамила Семеновна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, первый проректор — проректор по научной работе, зав. кафедрой «Техносферная и экологическая безопасность»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1558-5811

titova@pgups.ru

Соловьева Валентина Яковлевна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, зав. кафедрой «Инженерная химия и естествознание»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1571-2027

9046185117@mail.ru

Степанова Ирина Витальевна

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Инженерная химия и естествознание», доцент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2753-4649

ivstepanova88@mail.ru

Статья получена: 03.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Показано, что создание инновационного бетона, обладающего улучшенным набором физико-механических показателей, достигается целенаправленным воздействием на бетонную систему при помощи комплексной химической добавки, одновременно обладающей эффектом суперпластификации, стабилизирующим и реакционно-активного действия. Создание бетона для дорожных покрытий, отличающегося повышенными показателями прочности, устойчивости к трещинообразованию с раннего возраста до проектных значений и далее достигается подбором компонентов определенной природы при создании комплексной химической добавки, влияющей на протекание химических процессов внутри бетонной системы, обеспечивая формирование прочной структуры бетона. Установлено, что повышение морозостойкости, химической стойкости, водонепроницаемости усиливает добавление в модифицированную бетонную смесь воздухововлекающей добавки, что создает бетон химически высокостойким, повышенной прочности, устойчивости к трещинообразованию и морозостойкости.

Ключевые слова: дорожный бетон, химическая добавка, поликарбоксилатные полимеры, нанодисперсии, надежность, морозостойкость, трещиностойкость.

Next-generation road concrete — integration of self-compacting and increased physical and mechanical resistance

Titova Tamila Semenovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
First Vice-Rector - Vice-Rector for Research, Head of the Department of Technosphere and
Environmental Safety
Saint Petersburg, Russia
titova@pgups.ru

Solovieva Valentina Yakovlevna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering,
Head of the Department of Engineering Chemistry and Natural Science
Saint Petersburg, Russia
9046185117@mail.ru

Stepanova Irina Vitalievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Department of Engineering Chemistry and Natural Science, Associate Professor
St. Petersburg, Russia
ivstepanova88@mail.ru

Abstract. It has been demonstrated that the creation of innovative concrete with an improved set of physical and mechanical properties is achieved by targeted manipulation of the concrete system using a complex chemical additive that simultaneously exhibits superplasticizing, stabilizing, and reactive properties. The creation of concrete for road surfaces characterized by increased strength and crack resistance from an early age to design values and beyond is achieved by selecting specific components when creating a complex chemical additive that influences the chemical processes within the concrete system, ensuring the formation of a strong concrete structure. It has been established that the addition of an air-entraining admixture to the modified concrete mixture enhances frost resistance, chemical resistance, and water resistance, resulting in concrete with high chemical resistance, increased strength, crack resistance, and frost resistance.

Keywords: road concrete, chemical additive, polycarboxylate polymers, nanodispersions, reliability, frost resistance, crack resistance.

Введение

Транспортные магистрали — основа современной экономики, от которых зависит развитие городов и связность регионов. Для этого требуются надежные и долговечные дорожные покрытия, создание которых возможно при использовании инновационного бетона, от которого сегодня требуется не просто прочность, а целый комплекс свойств: устойчивость к образованию трещин, стойкость к экстремальным температурам, воздействию противогололедных реагентов, а также идеальная ровность и способность стать основой для интеллектуальных систем [1-5]. Именно созданию такого высокотехнологического материала — по-настоящему «умного» и сверхнадежного

посвящено научное исследование, ключевые результаты которого представлены в данной статье.

Создание инновационного бетона, для верхнего дорожного покрытия возможно в результате проектирования его основных физико-механических показателей:

- для обеспечения быстрого и качественного проведения строительных работ требуется бетон с улучшенными реологическими свойствами;
- высокими показателями прочности на сжатие, которые должны соответствовать классу В45 и выше, чтобы обеспечить устойчивость покрытия к повышенным механическим нагрузкам от транспорта;
- бетон должен обладать исключительной механической прочностью на изгиб, как в раннем возрасте (1 – 7 суток), которая обеспечивает скорость строительства, качество выполнения операций и предотвращение дефектов (образования трещин) на этапе твердения, так и проектном возрасте (28 суток и далее), которая обеспечивает надежность, долговечность и безопасность дорожного покрытия;
- бетон должен обладать повышенной устойчивостью к истиранию, так как поверхность покрытия подвергается абразивному воздействию шипованной резины, кроме этого, бетон должен отличаться повышенной устойчивостью к внешним негативным воздействиям, в том числе воздействию осадков, что достигается высокой прочностью на изгиб и деформативностью.

Решение указанных задач возможно в результате целенаправленного химического воздействия на бетонную систему при помощи новой химической добавки.

Основой добавки являются ПАВ на основе поликарбоксилатных полимеров, которые обеспечивают повышение устойчивости бетона к трещинообразованию в возрасте 1-7 суток, что является критически важным моментом для технологии строительства и определяет возможность снятия боковой опалубки и нарезки температурно-усадочных швов.

В качестве следующего компонента добавки использовали аминосодержащий полимер, который оказывает положительное влияние на повышение связности высокоподвижной самоуплотняющейся бетонной смеси, используемой при создании дорожного бетона с целью получения покрытия повышенной ровности с некоторой шероховатостью, обеспечивающей хорошее сцепление колеса с поверхностью дорожного покрытия.

В качестве аминосодержащего компонента использовали пропилендиамин, образующий контакт с катионами кальция, входящими в состав минералов портландцемента и гидратных фаз, формируя прочную структуру, оказывая положительное влияние на физико-механические характеристики бетона.

Для повышения реакционной активности создаваемой добавки в качестве дополнительного компонента вводили нанодисперсии диоксида кремния, SiO_2 , размером $(10^{-9} \dots 10^{-7})$ м, присутствие которых обеспечивает взаимодействие с первоначально образованными гидратными фазами в бетонной системе, повышая химическую устойчивость бетона, а также его надежность и долговечность [6-12].

Для дополнительного повышения морозостойкости использовали воздухововлекающую добавку, на основе древесной смолы, нейтрализованной едким натром с техническим названием СНВ в виде 5% водного раствора [13-16].

Методика исследований

Оценку эффективности и совместимости исследуемых компонентов добавки проводили относительно контрольного бетона следующего состава: портландцемент класса I 42,5Н – 540 кг/м³; песок по ГОСТ 8736-2014 средней крупности – 700 кг/м³; щебень по ГОСТ 8267-93 с максимальной крупностью зерна 10 мм – 860 кг/м³; В/Ц = 0,56. Эффективность компонентов добавки оценивали по расплыву конуса по ГОСТ Р 59715-2022 и прочностным характеристикам возрасте 7 суток, по ГОСТ 10180-2012.

Результаты проведенных исследований по оценке эффективности компонентов добавки представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Оценка эффективности компонентов добавки

№ п/п	Проектный класс бетона, В	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси, кг							Расплыв нормального конуса, см	Прочность, (возраст 7 суток), МПа	Коэффициент трещиностойкости, К _{тр.} = R _{взр.} /R _{сж.}			
		ПЦ	Компоненты добавки, % от массы цемента (кг)				B, л (B/Ц)							
			Поликарбоксилатный полимер №1	Поликарбоксилатный полимер №2	Пропилендиамин	Нанодисперсия, SiO ₂								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	B45	540	контрольный состав				300 (0,56)	38	40,6	4,7	0,116			
			-	-	-	-								
2	B45	540	0,6	-	-	-	227 (0,42)	54	46,7	5,4	0,116			
3	B45	540	0,8	-	-	-	227 (0,42)	58	46,7	5,4	0,115			
4	B45	540	1,0	-	-	-	227 (0,42)	58	47,0	5,4	0,115			
5	B45	540	0,8	0,4	-	-	227 (0,42)	61	47,9	5,65	0,118			
6	B45	540	0,8	0,6	-	-	227 (0,42)	65	49,1	5,9	0,12			
7	B45	540	0,8	0,8	-	-	227 (0,42)	66	49,6	5,9	0,12			
8	B45	540	0,8	0,6	0,3	-	227 (0,42)	66	52,1	6,25	0,12			
9	B45	540	0,8	0,6	0,5	-	227 (0,42)	68	54,1	6,5	0,12			
10	B45	540	0,8	0,6	0,7	-	227 (0,42)	69	54,4	6,5	0,12			
11	B45	540	0,8	0,6	0,5	0,4	227 (0,42)	69	55,7	6,7	0,121			
12	B45	540	0,8	0,6	0,5	0,6	227 (0,42)	70	57,6	7,0	0,123			
13	B45	540	0,8	0,6	0,5	0,8	227 (0,42)	70	58,0	7,1	0,123			

Результаты экспериментальных исследований показали, что совместное присутствие поликарбоксилатных полимеров эффективно, они обеспечивают эффект суперпластификации, повышая подвижность бетонной смеси на 71%. Рост прочности на изгиб превышает рост прочности на сжатие, что, по-видимому, является результатом образования сложных полимерных цепей.

Наличие полос поглощения в области 1346–1240 см⁻¹ на ИК-спектрах подтверждают теоретическое предположение о взаимосвязи двух полимеров. Следующий компонент добавки, представленный пропилендиамином повышает прочность на сжатие и на растяжение при изгибе в одинаковой степени, возможно, в результате упрочнения структуры бетона при ее формировании, что обусловлено образованием новых контактов (по данным ИК-спектроскопических исследований) в области (600–610) см⁻¹ между атомами азота аминодержащих углеводородов с катионом Ca²⁺ гидроксида кальция или гидросиликатов кальция.

Нанодисперсии диоксида кремния проявили хорошую совместимость со всеми используемыми компонентами создаваемой добавки: дополнительно увеличили подвижность бетонной смеси, расплыв конуса составил 70 см, что соответствует марке РК2 в соответствии с ГОСТ Р 59714-2022, повысилась устойчивость к трещинообразованию, что подтверждается увеличением коэффициента трещиностойкости, K_{тр.} = R_{изг.}/R_{сж.} до значения 0,123, который выше, чем у контрольного состава на 7,0%, для высокопрочного бетона — это достаточно высокий показатель, особенно, в раннем возрасте, что повышает надежность проведения строительных работ.

На основании полученных положительных результатов определено рациональное количество каждого компонента, входящего в состав создаваемой комплексной химической добавки.

Состав комплексной химической добавки, мас.%:

- водный раствор поликарбоксилатного полимера №1, ρ = 1,021 г/см ³ и pH = (6,0 – 7,0)	32,0
- водный раствор поликарбоксилатного полимера №2, ρ = 1,023 г/см ³ и pH = 6,5	24,0
- водный раствор пропилендиамина с плотностью ρ = 0,97 г/см ³ и pH = 9,5	20,0
- водный раствор золя кремниевой кислоты, содержащей нанодисперсии SiO ₂ с плотностью ρ = 1,023 г/см ³ и pH = 3,5	24,0

Результаты по оценке рационального количества добавки указаны в Таблице 2.

При использовании КХД наилучшие результаты по показателям удобоукладываемости и прочности достигаются при ее введении в бетонную смесь в количестве (0,8 – 1,2)% от массы цемента, совместное присутствие рассматриваемых компонентов является благоприятным, придавая добавке эффект суперпластификации и стабилизации, что подтверждается увеличением подвижности бетонной смеси при уменьшении В/Ц отношения.

Как указывалось выше, бетон для дорожных покрытий эксплуатируется в достаточно суровых условиях, постоянно подвергается интенсивным механическим, а также внешним негативным и температурным воздействиям.

Таблица 2

Оценка эффективности комплексной химической добавки

№ п/п	Проектный класс бетона, В	Расход основных компонентов на 1 м ³ бетонной смеси, кг			Удобоукладываемость (расплыв конуса), см	Прочность, МПа (возраст 7 суток)		Коэффициент трещинностойкости, $K_{тр.} = R_{изг.}/R_{сж.}$
		ПЦ	КХД*, % от массы цемента	Вода (В/Ц)		на сжатие	на растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	В45	540	-	300 (0,56)	38	40,6	4,7	0,116
2	В45	540	0,4	248 (0,46)	59	48,0	5,7	0,118
3	В45	540	0,6	232 (0,43)	70	54,0	6,5	0,120
4	В45	540	0,8	221 (0,41)	72	60,0	7,4	0,123
5	В45	540	1,0	216 (0,40)	74	62,0	7,8	0,126
6	В45	540	1,2	210 (0,39)	74	60,0	7,7	0,124
7	В45	540	1,4	210 (0,39)	74	57,0	6,9	0,122

*КХД — разработанная комплексная химическая добавка.

С целью повышения надежности и долговечности бетона целесообразно дополнительно рассмотреть использование воздухововлекающей добавки.

В качестве воздухововлекающей добавки использовали 5% раствор СНВ (смолы нейтрализованной воздухововлекающей) в количестве 0,05% от массы цемента, которую вводили непосредственно в воду затворения, чтобы не вызвать коагуляцию разработанной комплексной химической добавки. Комплексные физико-механические характеристики дорожного бетона (Таблица 3) показали, что бетон целесообразно использовать для дорожных покрытий.

Комплексные физико-механические исследования дорожного бетона проектного возраста показали, что прочность на растяжение при изгибе соответствует классу В_{tb}9,9 и морозостойкость марки F₂400.

**Комплексные физико-механические показатели
модифицированного бетона**

$\Pi\chi, \text{кг}/\text{м}^3$	$\text{КХД, \% от массы цемента}$	$\text{Добавка СНВ, \% от массы цемента}$	$B, \text{л (В/Ц)}$	$\text{Удобоукладываемость (расплыв конуса), см}$	$\text{Воздухововлечение, \%}$	$\text{Прочность на сжатие, МПа/фактический класс бетона, В}$	$\text{Прочность на растяжение при изгибе, МПа/фактический класс бетона, В}_{\text{изг}}$	$K_{\text{тр.}} = R_{\text{изг.}}/R_{\text{ск.}}$	$\text{Марка по морозостойкости, } F_2$	$\text{Марка по водонепроницаемости, } W$	$\text{Коэффициент химической стойкости, } K_{\text{х.с.}}$
540	-	-	0,56	38	2,9	57/B45	6,5/ $B_{\text{tb}} 5,2$	0,114	200	8	0,43
540	1,0	-	0,40	74	3,6	85/B68	12,3/ $B_{\text{tb}} 9,9$	0,145	300	12	0,87
540	1,0	0,05	0,39	76	4,7	83/B66	12,0/ $B_{\text{tb}} 9,6$	0,144	400	14	0,89

Нанодисперсии диоксида кремния образуют новые гидратные фазы типа низкоосновного гидросиликата кальция — окенита $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot6\text{H}_2\text{O}$, для которого межплоскостное расстояние $d/n=(3,56; 3,07; 3,05; 2,93; 1,80)\cdot10^{-10}$ м. Окенит кристаллизуется в виде длинных волокон, твердость которого равна 5 [17-20].

Выводы

Научно-экспериментальные исследования показали перспективность использования разработанной комплексной химической добавки в сочетании с воздухововлекающей добавкой для создания самоуплотняющегося бетона с улучшенными физико-механическими характеристиками, который целесообразно рекомендовать к использованию при строительстве транспортных магистралей.

Список литературы

1. Svatovskaya L., Urov O., Mikhailova K., Supeliuk T. Information assessment of natural geosystem preservation in geoconstruction by improving the quality of concrete. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 405-411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42
2. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35
3. Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Синицин Д.А. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14. № 6. С. 493-500. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500
4. Soloviova V., Stepanova I., Ershikov N., Soloviov D. Improving the properties of composite materials for civil engineering. // E3S Web of Conferences. 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018. 2019. С. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102015
5. Сватовская Л.Б. Модифицирование поверхности минерального искусственного камня. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VI

Международной научно-практической интернет-конференции. 2019. С. 16-19. <https://elibrary.ru/TOMVPU>

6. Сватовская Л.Б. Возможное применение периодического закона Д.И. Менделеева в строительной деятельности. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VI Международной научно-практической интернет-конференции. 2019. С. 5-12. <https://elibrary.ru/KKOXYQ>

7. Соловьева В.Я. и др. Химическая экспертиза строительных материалов и изделий. / В.Я. Соловьева, Л.Л. Масленникова, М.С. Абу-Хасан, М.В. Шершнева, И.В. Степанова, Д.В. Соловьев, А.С. Сахарова, М.М. Байдарашвили, Н.А. Шредник. Санкт-Петербург, 2023. <https://elibrary.ru/LRGALS>

8. Сахарова А.С., Байдарашвили М.М., Петряев А.В., Мальчевская К.С. Современные исследования в области дорожного строительства с учетом геоэкологических вызовов. // Августин Бетанкур: от традиций к будущему инженерного образования. Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 181-185. <https://elibrary.ru/UPUDOW>

9. Сватовская Л.Б. и др. Инновационные естественно-научные технические решения в строительной деятельности / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, М.В. Шершнева, М.С. Абу-Хасан, Л.Л. Масленникова, М.М. Байдарашвили // ПЕРСПЕКТИВЫ БУДУЩЕГО В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ. Сборник тезисов национальной научно-технической конференции. 2017. С. 108-109. <https://elibrary.ru/YVXXOH>

10. Беленцов Ю.А., Казанская Л.Ф., Докшина Е.А. Роль однородности материала в точности определения прочностных характеристик высокопрочных бетонов. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. № 2. С. 499-508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508

11. Казанская Л.Ф., Майер В.А., Сибгатуллин Э.С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21. № 4. С. 931-943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

12. Соловьев Д.В. Высокоэффективный бетон для дорожных покрытий. // Значение трудов Д.И. Менделеева в современных инновационных решениях. сборник трудов X международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 120-126. <https://elibrary.ru/LOJXVE>

13. Соловьев Д.В. Физико-химические основы создания высокоэффективного бетона для дорожных покрытий. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции. 2020. С. 42-46. <https://elibrary.ru/UHBEVU>

14. Джилкибаев Е.С., Бекенов Р.М., Кулымбетова С., Шоман Г.Н. Воздействие колес автомобиля на дорожные покрытия. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016). Сборник статей VIII Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор Е.В. Агеев. 2016. С. 80-85. <https://elibrary.ru/XAURFT>

15. Зайченко Н.М., Назарова А.В., Соколова А.А. Цементобетонные дорожные покрытия из самоуплотняющихся бетонных смесей. // Строитель Донбасса. 2018. № 1 (2). С. 41-48. <https://elibrary.ru/OOJKAS>

16. Мюллер М., Хорст-Михаэл Л. Долговечные бетонные дорожные покрытия с использованием различных вяжущих веществ в верхнем и нижнем слоях бетона. // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. сборник материалов международной научной конференции. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». 2017. С. 696-703. <https://elibrary.ru/XSNHZD>

17. Хвостова А.А., Антоненко Н.Н., Орехов С.А., Дергунов С.А. Современные дорожные покрытия. // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики. материалы Международной научно-методической конференции. Самара-Оренбург, 2022. С. 13. <https://elibrary.ru/YDYNBS>

18. Крамар Л.Я., Иванов И.М., Шулдяков К.В., Мордовцева М.В. Влияние суперпластификаторов на микроструктуру и упругие свойства бетона. // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 17-24. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-17-24
19. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Погорелов С.Н., Иванов И.М. Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22. № 3. С. 35-45. DOI: 10.14529/build220304
20. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В. Функциональные наполнители полимерных композиционных материалов. // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1 (12). С. 41-44. <https://elibrary.ru/DGXBVU>

References

1. Svatovskaya L., Urov O., Mikhailova K., Supeliuk T. Information assessment of natural geosystem preservation in geoconstruction by improving the quality of concrete. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 405-411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42
2. Soloviova V., Stepanova I., Soloviov D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35
3. Kasatkin S.P., Soloviova V.Ya., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsyn D.A. Highly effective nanomodified concrete of increased strength and durability. // Nanotechnology in Construction: Scientific Online Journal. 2022. Vol. 14. No. 6. Pp. 493-500. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500
4. Soloviova V., Stepanova I., Ershikov N., Soloviov D. Improving the properties of composite materials for civil engineering. // E3S Web of Conferences. 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018. 2019. С. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102015
5. Svatovskaya L.B. Modification of the surface of artificial mineral stone. // Innovative technologies in construction and geoecology. Proceedings of the VI International scientific and practical Internet conference. 2019. pp. 16-19. <https://elibrary.ru/TOMVPU>
6. Svatovskaya L.B. Possible application of D.I. Mendeleev's periodic law in construction activities. // Innovative technologies in construction and geoecology. Proceedings of the VI International scientific and practical Internet conference. 2019. pp. 5-12. <https://elibrary.ru/KKOXYQ>
7. Solovyova V.Ya. et al. Chemical Expertise of Construction Materials and Products. / V.Ya. Solovyova, L.L. Maslennikova, M.S. Abu-Hasan, M.V. Shershneva, I.V. Stepanova, D.V. Soloviev, A.S. Sakharova, M.M. Baidarashvili, N.A. Shrednik. Saint Petersburg, 2023.
8. Sakharova A.S., Baidarashvili M.M., Petryaev A.V., Malchevskaya K.S. Modern Research in Road Construction Taking into Account Geoecological Challenges. // Augustin Betancourt: From Traditions to the Future of Engineering Education. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2018. pp. 181-185. <https://elibrary.ru/UPUDOW>
9. Svatovskaya L.B. and others. Innovative Natural Science Engineering Solutions in Construction Activities / L.B. Svatovskaya, V.Ya. Solovyova, M.V. Shershneva, M.S. Abu-Hasan, L.L. Maslennikova, M.M. Baidarashvili // FUTURE PROSPECTS IN THE EDUCATIONAL PROCESS. Collection of abstracts of the national scientific and technical conference. 2017. Pp. 108-109. <https://elibrary.ru/YVXXOH>
10. Belentsov Yu.A., Kazanskaya L.F., Dokshina E.A. The role of material homogeneity in the accuracy of determining the strength characteristics of high-strength concrete. // Bulletin of the St. Petersburg Transport University. 2025. Vol. 22. No. 2. Pp. 499-508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508
11. Kazanskaya L.F., Mayer V.A., Sibgatullin E.S. Interrelationship of factors determining the durability of concrete. // Bulletin of the St. Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21. No. 4. Pp. 931-943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

12. Soloviov D.V. High-performance concrete for road surfaces. // The Importance of D.I. Mendeleev's Works in Modern Innovative Solutions. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024. Pp. 120-126. <https://elibrary.ru/LOJXVE>
13. Soloviov D.V. Physicochemical Foundations of Creating High-Performance Concrete for Road Surfaces. // Innovative Technologies in Construction and Geocology. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference. 2020. Pp. 42-46. <https://elibrary.ru/UHBEBU>
14. Dzhilkibaev E.S., Bekenov R.M., Kulymbetova S., Shoman G.N. Impact of vehicle wheels on road surfaces. // Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2016). collection of articles from the VIII International scientific and technical conference. Editor-in-chief E.V. Ageyev. 2016. pp. 80-85. <https://elibrary.ru/XAURFT>
15. Zaychenko N.M., Nazarova A.V., Sokolova A.A. Cement concrete road surfaces made of self-compacting concrete mixtures. // Stroitel Donbassa. 2018. No. 1 (2). pp. 41-48. <https://elibrary.ru/OOJKAS>
16. Müller M., Horst-Michael L. Durable concrete road pavements using different binders in the top and bottom layers of concrete. // Integration, partnership and innovation in construction science and education. Collection of materials of the international scientific conference. National Research Moscow State University of Civil Engineering. 2017. pp. 696-703. <https://elibrary.ru/XSNHZD>
17. Khvostova A.A., Antonenko N.N., Orekhov S.A., Dergunov S.A. Modern road pavements. // Science and education: current issues of theory and practice. Proceedings of the International scientific and methodological conference. Samara-Orenburg, 2022, p. 13. <https://elibrary.ru/YDYNBS>
18. Kramar L. Ya., Ivanov I. M., Shuldyakov K. V., Mordovtseva M. V. Influence of superplasticizers on the microstructure and elastic properties of concrete. // Construction materials. 2022, no. 10, pp. 17–24. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-17-24
19. Kramar L. Ya., Mordovtseva M. V., Pogorelov S. N., Ivanov I. M. Structure of cement stone with complex additives and its influence on the deformation properties of concrete. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2022. Vol. 22. No. 3. Pp. 35-45. DOI: 10.14529/build220304
20. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V. Functional fillers of polymer composite materials. // Polymers in Construction: Scientific Online Journal. 2024. No. 1 (12). Pp. 41-44. <https://elibrary.ru/DGXBVU>

Синтез пенного материала на основе золя кремниевой кислоты для гражданского и военного назначения

УДК 623.77

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0026>

Номер статьи: C0026

Шашков Алексей Иванович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
факультет инженерного и электромеханического обеспечения, начальник лаборатории
Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2439-0049

Alekseyshashkov@internet.ru

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой строительные материалы и технологии

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

Amsychova@yandex.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
адъюнкт, 42 кафедра

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg@gmail.ru

Статья получена: 01.11.2025. Одобрена: 17.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статьи является рассмотрение вопроса о обеспечении требуемого теплового состояния объекта. Показать учет новых механизмов распределения тепловых потоков и стабилизации пенного каркаса, обеспечивающих требуемое тепловое состояние объекта. Разработка методики синтеза пенного материала на основе золя кремниевой кислоты для теплоизоляции и снижения тепловой заметности объектов. В работе были использованы методы исследования физико-механических характеристик материала, метод конечных элементов, рентгенофазовый, дериватографический и микроскопический методы анализа. Получена близкая сходимость теоретических и экспериментальных исследований. Разработана методика синтеза пенного материала на основе золя кремниевой кислоты, которая приводит к упрочнению пенного каркаса на 23% в течение 9 месяцев твердения. Показано, что использование макро- и микрофибры в составе материала приводит к снижению ширины раскрытия трещин и увеличению кратности пены. С помощью метода конечных элементов проведено моделирование распределения тепловых потоков на объекте в масштабе 1:1, которое подтвердило обеспечение требуемого теплового состояния. Показано, что использование разработанного материала позволяет обеспечить требуемое тепловое состояние объекта по сравнению с существующими пенными покрытиями и минеральной ватой. Предложено новое техническое решение, обеспечивающее качественное распределение фиброволокна в объеме материала за счет новой конструкции пенообразующего патрона.

Ключевые слова: золь кремниевой кислоты, золь-гель переход, пенные материалы, теплоизоляция, тепловое состояние, пенообразующий патрон.

Synthesis of a silica sol-based foam material for civil and military applications

Shashkov Aleksei Ivanovich

Candidate of Technical Sciences,
A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
Faculty of Engineering and Electromechanical Support, Head of Laboratory
Saint Petersburg, Russia

Alekseyshashkov@internet.ru

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia

Amsychova@yandex.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
adjunct, Department 42
Saint Petersburg, Russia

Nesterovoleg@gmail.ru

Abstract. The purpose of this article is to examine the issue of ensuring the required thermal state of an object. To demonstrate the use of new mechanisms for heat flow distribution and foam stabilization, ensuring the required thermal state of an object. To develop a method for synthesizing a foam material based on silica sol for thermal insulation and reducing the thermal signature of objects. The study utilized methods for studying the physical and mechanical properties of the material, including finite element analysis, X-ray diffraction, derivatographic, and microscopic analysis. Close agreement between theoretical and experimental studies was achieved. A method for synthesizing a foam material based on silica sol was developed. This method results in a 23% strengthening of the foam framework over a 9-month curing period. The use of macro- and microfibers in the material was shown to reduce crack width and increase foam expansion. Using the finite element method, heat flow distribution across the object was simulated at a 1:1 scale, confirming that the required thermal state was achieved. The developed material was shown to provide the required thermal state for the object compared to existing foam coatings and mineral wool. A new technical solution is proposed that ensures high-quality fiber distribution within the material due to a new foam cartridge design.

Keywords: silica sol, sol-gel transition, foam materials, thermal insulation, thermal state, foaming cartridge.

Введение

Пенные материалы на основе золя кремниевой кислоты (SiO_2) представляют собой пористые структуры с высокой удельной поверхностью и низкой плотностью, синтезируемые золь-гель методом. Этот процесс, основанный на гидролизе и конденсации алcoxидов кремния, позволяет создавать материалы с контролируемой пористостью, что делает их перспективными для теплоизоляции и снижения теплового состояния в инфракрасном диапазоне (3,5–5,5 и 8–14 мкм) [1]. В работе исследован объект, где

требуется минимизация теплового контраста ($\Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$) при тепловыделениях до 400 кВт, пенные покрытия на основе золя SiO_2 обеспечивают теплопроводность $\lambda \leq 0,025 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ и долговечность более 5 лет, превосходя аналоги, такие как пенобетон ($\lambda = 0,038\text{--}0,073 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$) или минеральная вата ($\lambda = 0,042 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$): Табл. 1.

Таблица 1

Характеристики существующих теплоизоляционных материалов пониженных плотностей

Авторы	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Вид материала	Вид вяжущего	Коэффициент теплопроводности $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Технология получения
Иващенко Ю.Г.	125	неавтоклавный пенобетон	портландцемент	0,052	классическая
Сычева А.М. Елисеева Н.Н.	200			0,04	классическая
Славчева Г.С. Макарова Т.В	200			0,046	классическая
Тысячук В.В., Свинарев А.В.	250			0,055	баротехнология
Чжэньсин ДУ Вэнъцян Цзо	200			0,038	баротехнология
Вэй Ше, Цзяпин Лю	250			0,051	классическая
Э. Кирсли, Пи Джей	250			0,054	классическая
Эрика Холт Паула Райвио	300			0,073	классическая
ГОСТ 9573-2012	40-70	Мин. вата	фенолспирты, карбамидные смолы	0,42	создание волокнистого каркаса

Традиционные методы синтеза пен, включая механическое вспенивание и эмульсионные шаблоны, не обеспечивают стабильности пенного каркаса при длительной эксплуатации [2]. Золь-гель подход, напротив, стабилизирует пену через уплотнение геля, минимизируя вытекание жидкости и трещинообразование¹⁰. Актуальность исследования заключается в несовершенстве методик синтеза пенных материалов на основе органоминеральных связующих, а также технических и технологических решений их получения. Цель исследования — разработка методики синтеза пенных материалов на основе золя SiO_2 с экспериментальной верификацией результатов. Для достижения поставленной цели решена научная задача, заключающаяся в разработке методики синтеза пенных покрытий с учетом новых механизмов распределения тепловых потоков и стабилизации пенного каркаса, обеспечивающей требуемое тепловое состояние объекта в заданный период эксплуатации.

Выбор компонентов

Золь SiO_2 характеризуется способностью переходить в гель в результате чего жидкая фаза становится гелеобразной. Такой переход и уплотнение геля за счет выделения

¹⁰ Шилова О.А. Золь-Гель технология микро- и нанокомпозитов. Учебное пособие / Под. ред. О.А. Шиловой. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 304 с.

молекул воды в окружающую среду приводит к снижению его коэффициента теплопроводности на порядок (Рис. 1).

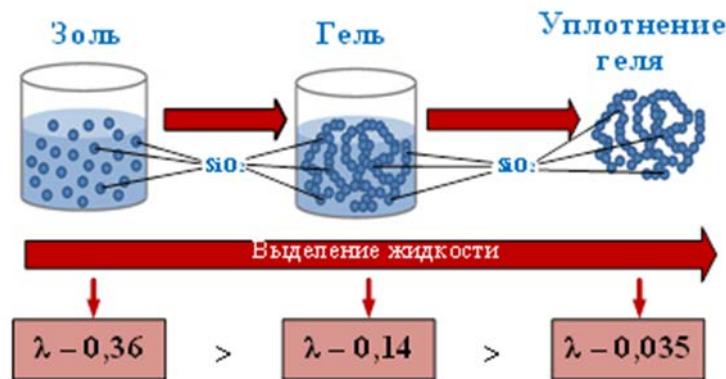


Рис. 1. Повышение теплозащитных свойств при золь-гель переходе

Изменение коэффициента теплопроводности при золь-гель переходе рассчиталось по формуле Ван Флека [3].

Предполагается, что при использовании золя SiO_2 как основного компонента для синтеза пенного материала и его последующее уплотнение в пенном каркасе приведет к снижению коэффициента теплопроводности всего покрытия и снизит тепловую заметность объекта.

В работе предложено ввести в состав полимерные микросфера, представляющие собой маленькие сферические полые шарики из пластика с заключенным в них газом — изобутаном, коэффициент теплопроводности которого на 32% ниже, чем у воздуха (Рис. 2). Это должно снизить скорость прохождения тепловых потоков через пенный материал и коэффициент его теплопроводности.

В работе предложено ввести в состав МПП1 алюминиевую пудру с высоким коэффициентом отражения $k_{\text{отр Al}} \geq 0,94$, что позволит отразить, переотразить и замедлить часть тепловых потоков в объеме пенного материала (Рис. 3) и снизить коэффициент его теплопроводности.

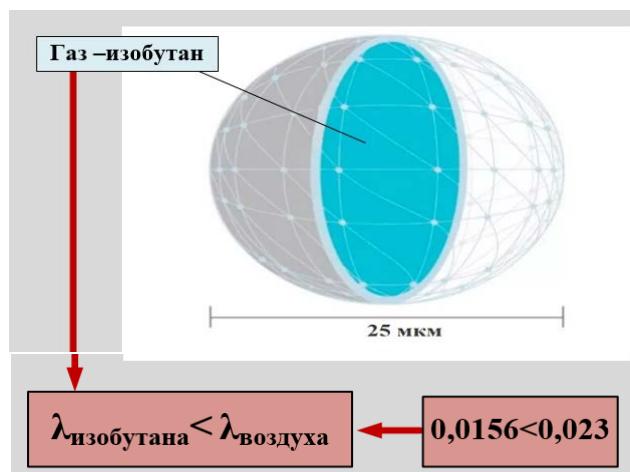


Рис. 2. Полимерная микросфера

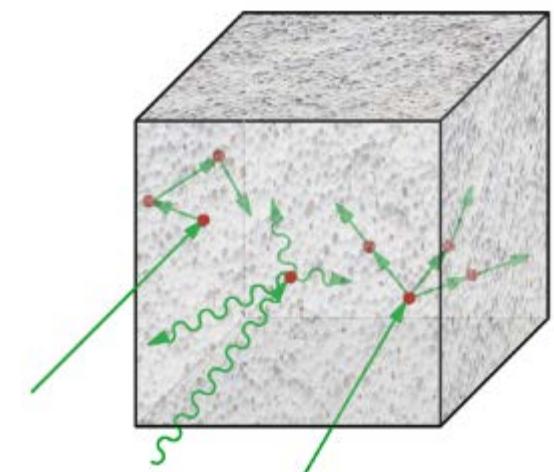


Рис. 3. Отражение и переотражение тепловых потоков в объеме МПП1 при введении алюминиевой пудры

Использование в составе компонентов с разными механизмами воздействия на проходящие тепловые потоки приведет к снижению коэффициента теплопроводности пенного материала и позволит скрыть тепловое состояние объекта [4].

Далее проводился количественный подбор компонентов с последующим изготовлением образцов пенного материала и экспериментальным определением температуры на поверхности макета объекта с нанесенным покрытием.

Для этого была проведена съемка и анализ тепловой сигнатуры макета объекта с использованием тепловизора.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента была изготовлена масштабированная модель объекта, представляющая собой однопролетный каркас. В качестве основания покрытия выступает ПВХ тент толщиной 0,3 мм с влагоотталкивающей пропиткой. Размеры модели объекта соответствуют масштабу $M = 1:60$ по отношению к реальному объекту.

Покрытия наносились на макет объекта слоем 5 см.

Порядок экспериментального получения пенного материала следующий:

1. Дозирование компонентов;
2. Смешивание компонентов до получения однородного пенообразующего раствора;
3. Взбивание пенообразующего раствора лабораторным миксером (не менее 3 мин.);
4. Определение кратности пенного материала.

Для имитации тепловых выделений использовался нагревательный прибор с электрическим управлением, позволяющий повышать температуру внутри макета. На внутренней поверхности макета устанавливался выносной датчик температуры, использовался тепловизор «Fluke TI200». Полученные снимки тепловой сигнатуры анализировались на предмет фиксации температурных значений в различных точках.

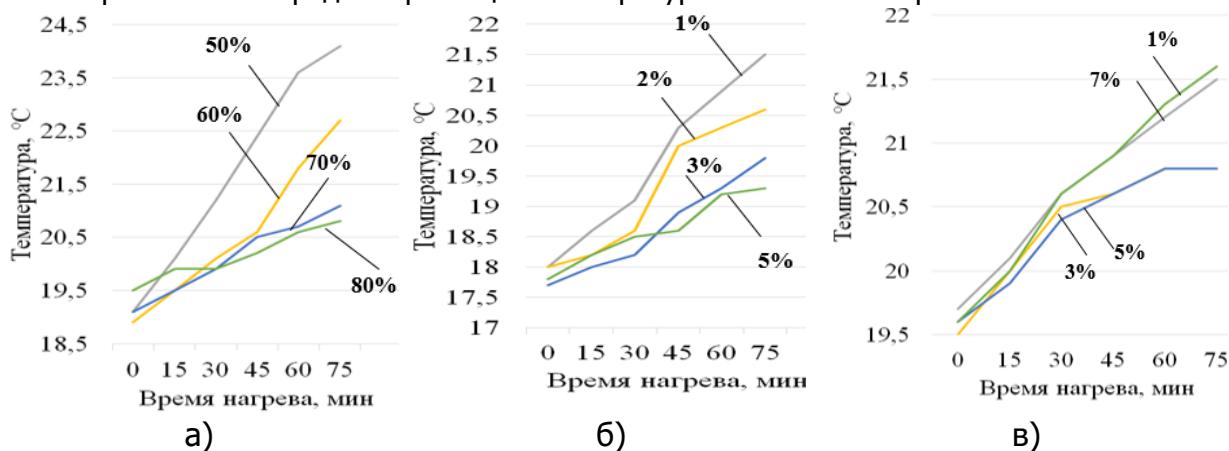


Рис. 4. Зависимости изменения температуры на поверхности макета объекта от количества введенных в состав компонентов:
а) золь SiO_2 ; б) полимерные микросферы; в) алюминиевая пудра

На Рис. 4 показаны зависимости изменения температуры на внешней поверхности макета объекта от количества введенных компонентов, полученные по предварительным экспериментальным данным.

Из Рис. 4 видно, что оптимальное для количества золя SiO_2 — 80% (но поскольку такая концентрация не обеспечивает $k \geq 10$, то количество золя SiO_2 снижается до 70%), алюминиевой пудры — 5% и полимерных микросфер — 3%.

$$\lambda_1 = -0,190 - 0,106 \cdot \varphi_{\text{сфер}} - 0,121 \cdot \varphi_{\text{золя}} - 0,763 \varphi_{\text{Al}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{сфер}}$ — массовая доля полимерных микросфер;

$\varphi_{\text{золя}}$ — массовая доля золя SiO_2 ;

φ_{Al} — массовая доля алюминиевой пудры.

По полученным данным были рассчитаны коэффициенты теплопроводности пенного материала в зависимости от количества вводимых компонентов. Полученные значения являлись исходными данными для разработки эмпирической зависимости коэффициента теплопроводности от введенных в состав компонентов, (1).

Далее в работе разработанная зависимость будет использоваться в трехмерном уравнении нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье) с внутренними распределенными источниками тепла [5,6] при моделировании и расчете распределения тепловых потоков на объекте в масштабе 1:1.

Обеспечение долговечности

Далее было необходимо подобрать такие компоненты, которые обеспечат возможность дальнейшего твердения пенного материала во времени и сохранят полученные свойства в период эксплуатации объекта.

Основная идея заключается в том, что для обеспечения долговечности пенного материала нужно повысить устойчивость пенного каркаса, определяющуюся вытеканием 50% жидкости из пенной пленки, после чего происходит ее разрушение. Если ввести в состав золь SiO_2 , который будет обеспечивать процессы твердения в пенном каркасе при золь-гель переходе (уплотнение и упрочнение геля SiO_2 за счет выделения молекул воды), то это будет приводить: 1) к уменьшению количества вытекающей жидкости из пенной пленки вплоть до нуля; 2) к дальнейшему набору прочности пенного материала в эксплуатации объекта.

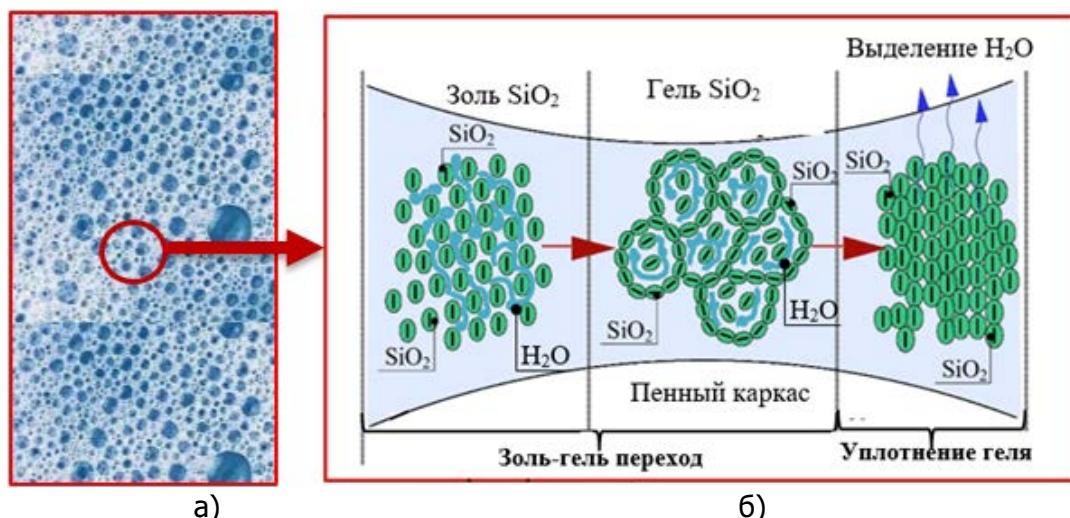


Рис. 5. Образование прочного пенного каркаса при золь-гель переходе: а) пенные пузырьки в объеме материала; б) каркас пенного пузырька

На Рис. 5 показано упрочнение пенного каркаса при переходе золя SiO_2 в гель. Процессы твердения сопровождаются связыванием молекул воды, что препятствует вытеканию жидкости из пенной пленки и предотвращает разрушение пены.

Кроме этого, с целью повышения прочности пенного каркаса в начальный момент времени в состав предложено ввести оксид цинка поскольку он может упрочнить пенную пленку за счет образования с белком пенообразователя прочного комплексного соединения (Рис. 6).

Из работ Шиловой О.А. известно, что в процессе уплотнения и упрочнения геля во времени (за счет выделения молекул воды) образуются трещины, которые могут повысить коэффициент теплопроводности. Для нивелирования этого процесса в работе предложено в состав ввести базальтовую фибрю с длиной волокна 6,4 мм (макрофибра) [7]. Такой размер является оптимальным с точки зрения армирования пенного материала и должен значительно снизить ширину раскрытия трещин в нем.

С целью обеспечения требуемой кратности пены в состав была введена базальтовая фибра с длинной волокна 100-500 мкм (микрофибра). Введение микрофибры при взбивании должно разбить часть связей, образовывающихся при золь-гель переходе и увеличить пенообразующую способность и кратности пены.

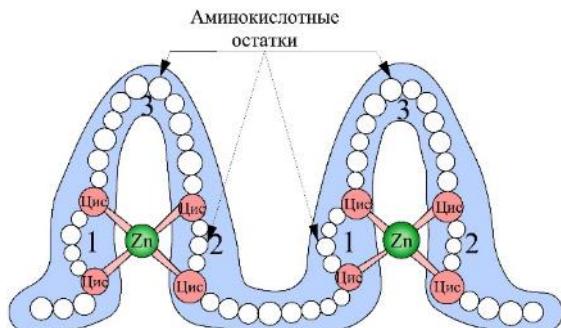


Рис. 6. Комплексное соединение оксида цинка с компонентами белкового пенообразователя (аминокислотные остатки) в пенным каркасе

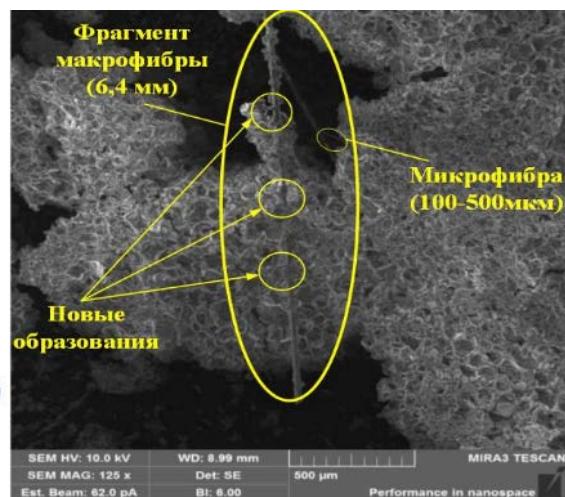


Рис. 7. Результаты электронной микроскопии образцов

На Рис. 6 показаны результаты проведенной электронной микроскопии образца из которых видны новообразования на поверхности макрофибры. На поверхности микрофибры новообразования отсутствуют, так как она не покрыта замасливателем.

В Таблице 2 показан набор прочности пенного материала во времени

Таблица 2
Набор прочности пенного материала σ , кг/см²

3 месяца	6 месяцев	9 месяцев
1,7	2,0	2,1

Далее в работе с целью подтверждения высказанных идей были проведены исследования фазового состава образцов ИК-Фурье спектроскопия [8] (Рис. 8).

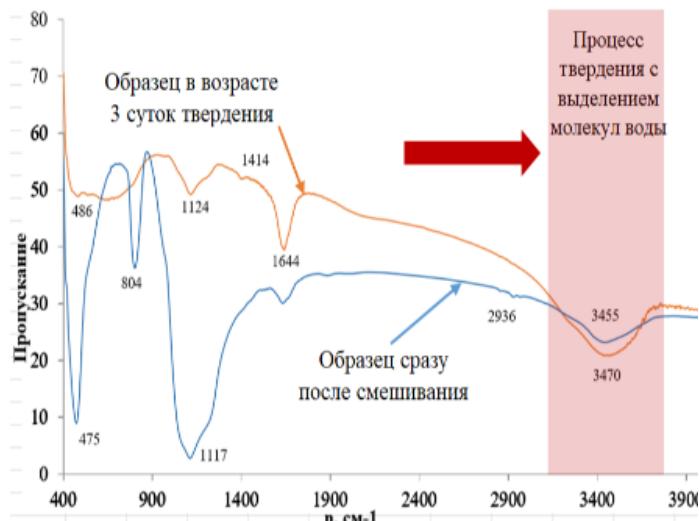
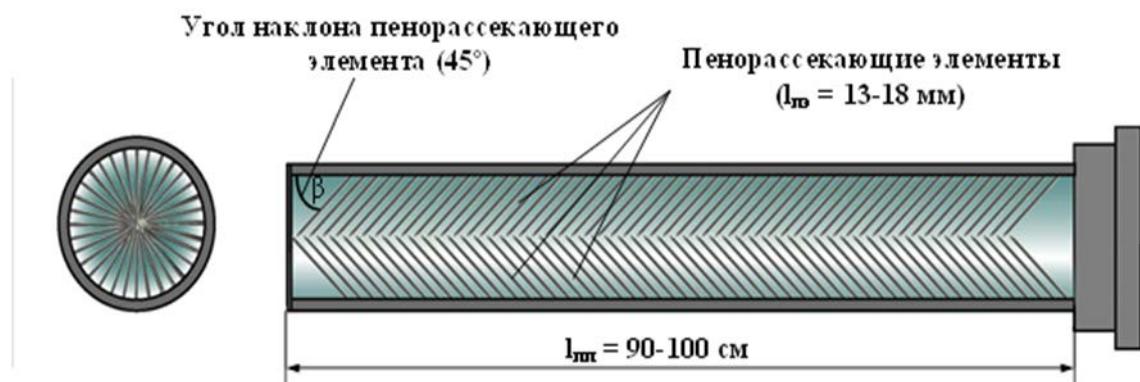


Рис. 8. ИК-спектры образцов

Из Рис. 8 видно, что полосы поглощения в области 3447 см⁻¹ (характеризуют H₂O в составе образцов) уменьшаются к трем суткам твердения по сравнению с образцами, обработанными сразу после смешивания, что говорит о выделении воды в окружающую среду при уплотнении геля. Присутствие молекул воды подтверждают высказанные предположения о возможности продолжения процессов упрочнения во времени, обеспечивающих сохранение полученных свойств в период эксплуатации объекта.

Технические решения

Новое техническое решение связано с получением пенного материала в состав которого входит макрофибра. Существующие средства получения препятствуют прохождению макрофибры и ведут к ее неравномерному распределению в их объеме за счет конструкции пенообразующего патрона. В связи с этим в работе предложено получение в пеногенераторе (используется для получения строительных пен, Рис. 9), с новым устройством пенопатрона (Рис. 10), в котором пенорассекающие элементы, имеющие консольное закрепление и расположены под углом к стенкам пенопатрона. Это позволяет макрофибре беспрепятственно проходить через всю длину патрона, равномерно распределиться в объеме материала и как следствие не превысить требуемую ширину раскрытия трещин ($b_{тр} \leq 0,2\text{мм}$).

**Рис. 9. Пеногенератор****Рис. 10. Пенопатрон**

Далее в работе с помощью метода конечных элементов¹¹ было проведено моделирование тепловых воздействий с применением в качестве теплоизоляционного слоя пенного материала, которое включало: моделирование параметров тепловых воздействий,

¹¹ Даутов Р.З., Карчевский Р. З. Введение в теорию метода конечных элементов / Учебное пособие. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2004. 239 с.

моделирование пенного материала, построение сетки конечных элементов, определение условий однозначности и определение времени теплового воздействия.

При моделировании расчет тепловых потоков производился по трехмерному уравнению нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье) [5, 6] с распределенными локальными источниками тепла с учетом разработанной эмпирической зависимости (1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Sigma q_w(x, y, z, \tau), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг°C); τ — время, мин; T — температура, К; λ — коэффициент теплопроводности, принимаемый по разработанной эмпирической зависимости (1), Вт/м·°C; q_w — мощность тепловых воздействий, Вт.

Выводы

Разработанная методика синтеза пенных материалов на основе золя SiO₂ обеспечивает теплопроводность $\lambda \leq 0,025$ Вт/м·К, долговечность более 5 лет, подтвержденные экспериментами и моделированием. Интеграция золь-гель перехода с механическим вспениванием открывает возможности для теплоизоляции и снижения тепловой заметности. Дальнейшие исследования должны фокусироваться на оптимизации для масштабирования и экологичности.

Список литературы

1. Мурашов М.В., Панин С.Д. Распознавание объектов в инфракрасном диапазоне. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 88 с.
2. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. С. 61-69.
3. Van Vlack D.H. Materials Science for Engineers. Ontario: Univ. Michigan Press, 1974. 472 p.
4. Степанов В.В. и др. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов / В.В. Степанов В.В., Ю.К. Петреня, А.М. Андреев, А.М. Костельцов, Э.Р. Маннанов, В.А. Талалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2018. Т. 11. № 4. С. 85-94.
5. Петрова И.В., Тюлина А. К. Решение уравнений математической физики методом Фурье. М.: РГУ нефти и газа, 2018. 93 с.
6. Симонов Б.В., Симонова И. Э. Преобразования двойных рядов Фурье. Волгоград : ВолгГТУ, 2019. 110 с.
7. Амерханова Г.И., Кияненко Е.А., Зенитова Л.А. Базальтовое волокно – наполнитель полиуретанов // Вестник технологического университета. 2020. № 8. С. 24-29.
8. Смит А. Прикладная ИК спектроскопия. М., 1982. 328 с.

References

1. Murashov M.V., Panin S.D. Object Recognition in the Infrared Range. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008. 88 p.
2. Tikhomirov V.K. Foams. Theory and Practice of Their Production and Destruction. Moscow: Chemistry, 1975. pp. 61-69.
3. Van Vlack D.H. Materials Science for Engineers. Ontario: Univ. Michigan Press, 1974. 472 p.
4. Stepanov V.V. et al. Influence of the properties of components on the effective thermal conductivity of polymer composite materials / Stepanov V.V., Petrenya Yu.K., Andreev A.M., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Talalov V.A.// Scientific and technical statements of SPbSPU. Physical and mathematical sciences, 2018. Vol. 11. No. 4. Pp. 85-94.

5. Petrova I.V., Tyulina A.K. Solution of equations of mathematical physics by the Fourier method. Moscow: Russian State University of Oil and Gas, 2018. 93 p.
6. Simonov B.V., Simonova I.E. Transformations of double Fourier series. Volgograd: VolGTU, 2019, 110 p.
7. Amerkhanova G.I., Kiyanenko E.A., Zenitova L.A. Basalt fiber as a filler for polyurethanes // Bulletin of the Technological University. Kazan. No. 8, 2020. Pp. 24-29.
8. Smith A., Applied IR Spectroscopy. Moscow, 1982. 328 p.