

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 7

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮЛЬ 2023 г. (815)



KNAUF

ООО «КНАУФ ГИПС»

КОНКУРС

СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ®

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ СТАТЕЙ



РОССИЙСКАЯ
ГИПСОВАЯ
АССОЦИАЦИЯ

Технологическая безопасность гипсовой отрасли:

результаты научных исследований

развитие технологии и оборудования

применение гипсовых материалов в строительстве



Редакция научно-технического журнала «Строительные материалы» и Российская гипсовая ассоциация объявляют конкурс научных и научно-практических статей по гипсовой тематике.

В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в течение года с № 8-2022 г. по № 8-2023 г. по темам:

- Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации существующих гипсовых материалов
- Развитие технологии производства гипсовых материалов и изделий
- Техногенные гипсовые отходы и возможность их вовлечения в производство
- Применение гипсовых материалов в строительстве

Объявление итогов конкурса и награждение победителей состоится в рамках 11-й Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

К участию в конкурсе приглашаются: магистранты, аспиранты, докторанты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук, сотрудники производственных предприятий и научно-производственные коллективы.

Рукописи статей необходимо представлять в редакцию в соответствии с техническими требованиями (см. раздел «Авторам» на сайте журнала <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>) с пометкой «На конкурс статей по гипсу».

Крайний срок подачи конкурсных статей 1 июля 2023 г.

Конкурсная комиссия определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса.

Победители конкурса награждаются ценными подарками, годовой подпиской на журнал «Строительные материалы» на 2024 г. и дипломами лауреата.

Авторам всех конкурсных статей вручаются дипломы участников конкурса.



www.rifsm.ru

www.journal-cm.ru

www.rosgips.ru

(499) 976-20-36, 976-22-08



20–21

сентября

2023 г.

п. Архыз (п. Романтик),
Карачаево-Черкесская
Республика

Оргкомитет:

140050, Московская обл.

п. Красково

ул. К. Маркса, д. 117,

РГА

Телефон:

+7 8-916-501-36-56

E-mail: rga-service@mail.ru

www.rosgips.ru

Российская гипсовая ассоциация

Российская академия архитектуры и строительных наук

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Научно-исследовательский институт строительной физики

при поддержке Правительства Карачаево-Черкесской Республики

Одиннадцатая Международная конференция «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА:

- 19.09 — заезд участников, организованный трансфер из аэропорта «Минеральные воды», экскурсия на горный перевал.
- 20.09 — пленарное заседание, доклады и сообщения, дружеский ужин.
- 21.09 — производственная экскурсия на Хабезский гипсовый завод, посещение музея и пикник на обочине.

Проведение конференции намечено в МФК «Романтик» (https://hotelromantik.ru/korp_places/).

Для размещения участников предлагаются гостиницы:

«Романтик 1», «Романтик 2», «Вертикаль», «Axis apart hotel», «Arkhyz Royal Resort», «Grizzly», «Баринь» и др.

Гостиницы бронируются самостоятельно. Проживание в стоимость участия в конференции не входит.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

Технический прогресс в области гипсовых материалов и изделий (исследования, производство и применение); ангидритовые вяжущие; гипсовые материалы в малоэтажном строительстве; привлекательность и механизмы инноваций в гипсовой отрасли; современное оборудование для производства гипсовых вяжущих, материалов и изделий на их основе; лаборатории, менеджмент качества, экологический менеджмент и их роль в обеспечении качества и долговечности гипсовых материалов; нормативно-техническая документация в соответствии с современными требованиями.

Генеральный спонсор:

KNAUF

ООО «КНАУФ ГИПС»

Генеральный информационный спонсор: журнал

СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ®

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Свид. о регистрации ПИ № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 7

Основан в 1955 г.

(815) Июль 2023 г.

Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Бетоны: наука и практика

Р.Я. АХТЯМОВ, Р.М. АХМЕДЬЯНОВ, Е.А. ГАМАЛИЙ, Г.Ф. АВЕРИНА

Актуальные проблемы развития нормативной базы производства и эксплуатации жаростойких бетонов..... 4

Н.С. СОКОЛОВ, С.Н. СОКОЛОВ, А.Н. СОКОЛОВ

Технология устройства монолитного железобетонного ростверка

в стесненных условиях функционирующего объекта 12

О.И. МАТВЕЕВА, Н.К. БАИШЕВ, А.В. ФЁДОРОВ, И.Р. ПАВЛЮКОВА, А.Л. ПОПОВ

Легкий пористый заполнитель из модифицированной цеолитщелочной шихты 17

Инновационные материалы КНАУФ для преобразования современного мегаполиса (Информация)..... 25

В.Н. МОРГУН

Научное обоснование структурной модификации свойств пенобетонов 29

Современные вяжущие материалы

Л.В. ИЛЬИНА, В.В. МОЛОДИН, Н.О. ГИЧКО, А.К. ТУЛЯГАНОВ

Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия 36

М.М. СУРОВЦОВ, Д.Д. ХАМИДУЛИНА, С.А. НЕКРАСОВА, Ю.А. МОРЕВА

Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем 43

Б.А. БОНДАРЕВ, М.Ш. САЛАМАНОВА, З.Х. ИСМАИЛОВА

Новые возможности применения некондиционного сырья в строительстве..... 49

А.М. АЙЗЕНШТАДТ, М.А. ФРОЛОВА, В.Е. ДАНИЛОВ, Т.А. ДРОЗДЮК, М.А. МАЛЫГИНА

Модификационные превращения сапонитсодержащего материала при механическом помоле 54

Н.И. КОЖУХОВА

Особенности модификации геополимера на основе перлита как экологически эффективного вяжущего..... 60

Результаты научных исследований

Н.В. ХОХЛОВА, Н.И. ШЕСТАКОВ, С.В. ФЕДОСОВ, И.И. ТИТОВА, Н.В. СЯЧИНОВА

Особенности изменения битума в процессе рекуперации 67

Г.Л. САФИНА

Численное решение задачи фильтрации с тремя типами частиц. 73

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

Founder of the journal: «STROYMATERIALY»
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Publisher: «STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Registration certificate PI № 77-1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Included in the list of journals of the Higher
Attestation Commission (Russia), Russian Science
Citation Index on the platform Web of Science
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 7

Founded in 1955 (815) July 2023

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Concretes: science and practice

R.Ya. AKHTYAMOV, R.M. AKHMEDYANOV, E.A. GAMALIY, G.F. AVERINA

**Current Problems of Development of the Regulatory Framework for the Production
and Operation of Refractory Concrete 4**

N.S. SOKOLOV, S.N. SOKOLOV, A.N. SOKOLOV

**Technology for The Installation of a Monolithic Reinforced Concrete Grillage in Cramped Conditions
of a Functioning Facility. 12**

O.I. MATVEEVA, N.K. BAISHEV, A.V. FEDOROV, I.R. PAVLYUKOVA, A.L. POPOV

Light Porous Aggregate from a Modified Composition of Zeolite-Alkali Batch 17

Innovative KNAUF Materials for the Transformation of the Modern Metropolis (Information) 25

V.N. MORGUN

Scientific Justification for Structural Modification of Foam Concrete Properties 29

Modern binding materials

L.V. IL'INA, V.V. MOLODIN, N.O. GICHKO, A.K. TULYAGANOV

Improving the Strength Characteristics of Cement Conglomerates with Directional Additives. 36

M.M. SUROVTSOV, D.D. KHAMIDULINA, S.A. NEKRASOVA, Y.A. MOREVA

Use of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Cement Binder 43

B.A. BONDAREV, M.Sh. SALAMANOVA, Z.Kh. ISMAILOVA

New Possibilities for the Application of Unconditional Raw Materials in Construction. 49

A.M. AYZENSHTADT, M.A. FROLOVA, V.E. DANILOV, T.A. DROZDYUK, M.A. MALYGINA

Modification Transformations of Saponite-Containing Material During Mechanical Grinding. 54

N.I. KOZHUKHOVA

Modification Specifics of Perlite-Based Geopolymer as Eco-Friendly Cement 60

Results of scientific research

N.V. KHOKHLOVA, N.I. SHESTAKOV, S.V. FEDOSOV, I.I. TITOVA, N.V. SYACHINOVA

Features of Bitumen Changes in the Recovery Process 67

G.L. SAFINA

Numerical Solution of the Filtration Problem with Three Types of Particles 73

The authors of published materials are responsible for the accuracy of the submitted information, the accuracy of the data from the cited literature and for using in articles data which are not open to the public. The Editorial Staff can publish the articles as a matter for discussion, not sharing the point of view of the author. Reprinting and reproduction of articles, promotional and illustrative materials are possible only with the written permission of the editor-in-chief. The Editorial Staff is not responsible for the content of advertisements and announcements.

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,
инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,
д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,
д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,
д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,
д-р техн. наук, директор Российской
гипсовой ассоциации (Москва)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,
д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,
канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита
и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,
д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

КОРОЛЕВ Е.В.,
д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

КОТЛЯР В.Д.,
д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

ЛЕОНИЧ С.Н.,
д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,
д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,
д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,
д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,
д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,
д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

РУДАКОВ О.Б.,
д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

СТРОКОВА В.В.,
д-р техн. наук, советник РААСН (Белгород)

ТРАВУШ В.И.,
д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,
д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

ФИШЕР Х.-Б.,
доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,
д-р техн. наук, профессор (Казань)

ШЕБЛ С.М.,
д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,
канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,
д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,
д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,
engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,
Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

ASKADSKIY A.,
Doctor of Science (Chemistry),
Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,
Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

BURYANOV A.,
Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association
of gypsum (Moscow)

EROFEEV V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS
(Saransk)

FEDOSOV S.,
Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS
(Moscow)

FISHER H.-B.,
Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

GORIN V.,
Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite
and Haydite Concrete Producers (Samara)

KHOZIN V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

KOROLEV E.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

KOTLYAR V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

LEONOVICH S.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,
Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS
(Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,
Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,
Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian
Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

RUDAKOV O.B.,
Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

SHEBL S.M.,
Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,
Candidate of Science (Engineering), ООО «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

STROKOVA V.
Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

TRAVUSH V.,
Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

VERESHCHAGIN V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

YAKOVLEV G.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

Р.Я. АХТЯМОВ, канд. техн. наук (sekr@7359808.ru),
Р.М. АХМЕДЬЯНОВ, канд. техн. наук (lab@2170812.ru),
Е.А. ГАМАЛИЙ, канд. техн. наук (eagamaliy@mail.ru),
Г.Ф. АВЕРИНА, канд. техн. наук (avergf@gmail.com)

ООО «Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов» (454047, г. Челябинск, ул. Сталеваров, 5, корп. 2)

Актуальные проблемы развития нормативной базы производства и эксплуатации жаростойких бетонов

Развитие производства жаростойких бетонов и расширение сферы их применения при возведении объектов высокой степени ответственности, в том числе объектов атомной промышленности, обуславливает необходимость детального анализа действующего фонда нормативных документов для выявления степени их соответствия перспективным тенденциям в области научных разработок и возрастающим требованиям промышленного комплекса. В результате анализа положений нормативной документации определен перечень проблем, включающий несоответствия между положениями одновременно действующих нормативных документов и отсутствие критериев в нормативной базе для применения перспективных типов жаростойких бетонов, несмотря на накопленный многолетний научно-практический опыт в этой сфере. Предложены варианты корректировки и дополнения существующей нормативно-технической базы, регулирующей область производства, контроля качества и эксплуатации жаростойких бетонов и конструкций с их использованием.

Ключевые слова: жаростойкие бетоны, нормативная документация, подбор состава бетона, самоуплотняющиеся бетонные смеси, мелкозернистые бетоны, заполнители, сухие смеси.

Для цитирования: Ахтямов Р.Я., Ахмедьянов Р.М., Гамалий Е.А., Аверина Г.Ф. Актуальные проблемы развития нормативной базы производства и эксплуатации жаростойких бетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 4–11.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-4-11>

R.Ya. AKHTYAMOV, Candidate of Sciences (Engineering) (sekr@7359808.ru),
R.M. AKHMEDYANOV, Candidate of Sciences (Engineering) (lab@2170812.ru),
E.A. GAMALIY, Candidate of Sciences (Engineering) (eagamaliy@mail.ru),
G.F. AVERINA, Candidate of Sciences (Engineering) (avergf@gmail.com)
"Ural Research Institute of Building Materials" LLC (building 2, 5, Stalavarov Street, Chelyabinsk, 454047, Russian Federation)

Current Problems of Development of the Regulatory Framework for the Production and Operation of Refractory Concrete

The development of the production of refractory concretes and the expansion of their scope in the construction of high-critical facilities, including nuclear facilities, necessitates a detailed analysis of the current fund of regulatory documents. It is necessary to identify the degree of their compliance with trends in the field of scientific developments and with the increasing requirements of the industrial complex. As a result of the analysis of regulatory documentation, a list of problems was identified. Among other things it was found the inconsistencies between the provisions of simultaneously acting regulatory documents. It was also found that there is no regulatory framework for the use of promising types of refractory concrete, despite the accumulated many years of scientific and practical experience in this area. Variants of updating and supplementing the existing regulatory and technical base regulating the area of production, quality control and maintenance of refractory concretes and structures with their use are proposed.

Keywords: refractory concretes, normative documentation, design of composition, self-compacting concrete mixtures, fine-grained concretes, aggregates, dry mixes.

For citation: Akhtyamov R.Ya., Akhmedyanov R.M., Gamaliy E.A., Averina G.F. Current problems of development of the regulatory framework for the production and operation of refractory concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-4-11>

Оборудование, функционирующее при высокой температуре, обеспечивает основные технологические переделы практически во всех отраслях промышленности, в том числе на предприятиях черной и цветной металлургии, производства строительных материалов, нефтеперерабатывающей и химической промышленности. В последние десятилетия жаростойкие бетоны получили распространение также при возведении сооружений атомных электростанций. В настоящее время Госкорпорацией «Росатом» реализуется перспективный проект «Прорыв» в области ядерной энергетики, нацелен-

ный на создание замкнутого ядерного топливного цикла на базе реакторов на быстрых нейтронах, в перспективе способных обеспечить практически безотходную ядерную энергетику. В данном проекте в качестве теплоносителя предполагается использование расплавленного свинца, что обуславливает необходимость безальтернативного применения жаростойких бетонов для возведения корпуса реакторного блока [1, 2].

Известно, что к атомным станциям предъявляется целый ряд специальных требований по технологической, ядерной, радиационной и экологиче-

ской безопасности, выполнение которых должно предотвратить возникновение катастроф с трудноустраняемыми последствиями [3]. С точки зрения обеспечения безопасности объектов АЭС залогом их длительной безаварийной работы являются правильный выбор материалов на стадии проектирования и тщательный контроль их качества при строительстве [4]. Эти требования относятся не только к объектам атомной промышленности, но и практически ко всем высокотемпературным агрегатам других отраслей.

Однако, несмотря на специфику и высокий уровень ответственности агрегатов атомной промышленности, на данный момент нормативно-правовая и нормативно-техническая база, регулирующая процессы производства, контроля качества и эксплуатации жаростойких бетонов, является недостаточной и местами устаревшей. На начало 2023 г. проектные организации могут руководствоваться всего шестью основополагающими нормативно-техническими документами, действующими в этой области:

– ГОСТ 20910–2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия»;

– СП 27.13330.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04–84»;

– СП 52-110–2009 «Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам»;

– СП 83.13330.2016 «Промышленные печи и кирпичные трубы. Актуализированная редакция СНиП III-24–75»;

– Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур (к СНиП 2.03.04–84), 1985 г.;

– Технология изготовления жаростойких бетонов (справочное пособие к СНиП 3.09.01.85), 1991 г.

При этом ни один из данных документов не фигурирует в перечне обязательных к исполнению по постановлению Правительства РФ от 28 мая 2021 г. № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985). Их использование носит рекомендательный характер (Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020) «О стандартизации в Российской Федерации»). Несмотря на ограниченность фонда нормативной документации, она продолжает быть исключительно востребованной. По этой причине весьма важно не только поддерживать существующую нормативно-техническую базу, разработанную специалистами научной школы

К.Д. Некрасова НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, но и обеспечивать ее развитие с целью соответствия современному уровню науки и техники.

Проведенный анализ показал, что для нормативной базы, регулирующей область производства и эксплуатации жаростойких бетонов, характерна проблема недостаточного числа нормативных документов. Также прослеживаются несоответствия между отдельными ее документами, подкрепленные неучтенным научно-практическим опытом. На данный момент нормативная база, регулирующая область производства жаростойких бетонов, уже не в полной мере соответствует практическим запросам и возможностям современного материаловедения, а именно:

– в документах, регламентирующих процессы производства жаростойких бетонов, не отображена возможность применения мелкозернистых бетонов и самоуплотняющихся бетонных смесей. Закономерно отсутствуют и правила подбора их составов, учитывающие также особенности применения легких заполнителей и огнеупорных заполнителей с высокой плотностью зерен;

– в сводах правил, регулирующих процессы проектирования конструкций на основе жаростойких бетонов, также нет необходимых данных для расчетов деформативных характеристик бетонов мелкозернистой структуры, таких как модуль упругости, коэффициент ползучести, коэффициенты условий работы;

– в документации, определяющей условия производства жаростойких бетонов, практически не раскрыты аспекты применения фосфатных связующих, при том что в сводах правил, регулирующих область проектирования конструкций на основе жаростойких бетонов, композиты на основе фосфатных связующих рекомендуются к применению при определенных видах агрессивных сред эксплуатации;

– в тексте стандарта ГОСТ 20910–2019 возможность изготовления сухих смесей для получения жаростойких бетонов регламентирована ошибочной ссылкой на ГОСТ 7473, исключающей правильность применения заданных стандартом методов контроля качества.

Проанализируем перечисленные недостатки более подробно.

Основным нормативно-правовым документом, регламентирующим область производства жаростойких бетонов, является межгосударственный стандарт ГОСТ 20910 «Бетоны жаростойкие. Технические условия», первое издание которого датируется 1975 г., последнее – 2019 г.

В новой редакции стандарта существенно увеличился набор допустимых марок по удобоукладываемости бетонных смесей для жаростойких бетонов. К существующему диапазону жестких смесей Ж1–Ж4 добавили линейку подвижных бетонных смесей П1–П4 и выше.



Рис. 1. Бетонирование густоармированной конструкции с использованием самоуплотняющейся смеси для жаростойкого бетона BRP B30 I11 F₁150 W8 T₁40, ГОСТ 20910–2019, полученной из сухой смеси

Fig. 1. Construction of a reinforced structure using self-compacting mixture for refractory concrete BRP B30 I11 F₁150 W8 T₁40 GOST 20910–2019 made of dry mix

В настоящее время известны научно-исследовательские работы, посвященные разработке и опыту успешного применения самоуплотняющихся бетонных смесей для производства конструкций из жаростойкого бетона [5, 6]. Использование таких типов смесей позволяет производить бетонирование особо сложных густоармированных, тонкостенных и труднодоступных конструкций, существенно упрощает технологический процесс (рис. 1) [7–9].

Однако отсутствие в нормативной документации прямых указаний о возможности применения бетонных смесей марок по удобоукладываемости Р1–Р6 и РК1–РК3 для производства жаростойкого бетона ограничивает возможность их промышленного внедрения как для производителей, так и для потребителей. Условно можно предположить, что подпункт 4.4.23 ГОСТ 20910–2019 допускает использование растекающихся и самоуплотняющихся бетонных смесей, так как предполагает получение бетонных смесей более высоких марок по удобоукладываемости. Однако, как и для указанных в стандарте бетонных смесей марок по подвижности П1–П4, для растекающихся и самоуплотняющихся бетонных смесей остается открытым вопрос о методике подбора состава с заданными характеристиками.

Согласно подп. 4.4.17 ГОСТ 20910–2019 составы следует подбирать, исходя из технологических требований, предъявляемых к изготовлению жаростойких бетонов. Сноска под данным подпунктом указывает, что на территории Российской Федерации необходимо руководствоваться требованиями из издания «Технология изготовления жаростойких бетонов: Справочное пособие к СНиП 3.09.01–85 и СНиП 3.03.01–87» от 1991 г. В отличие от претерпевшего ряд актуализаций стандарта ГОСТ 20910 данный документ редакции не подвергался. Так, на данный момент единственная предлагаемая к ис-

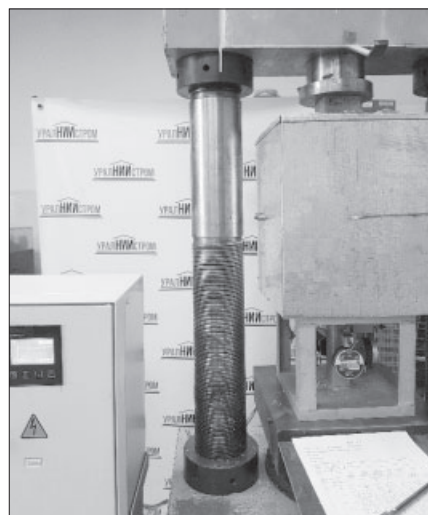


Рис. 2. Установка конструкции ООО «УралНИИСтром» для определения деформативных характеристик бетона при нагреве до 1000°C

Fig. 2. Equipment to determine the deformation characteristics of concrete in process of heating up to 1000°C – designed by «UralNIISTrom» LLC

пользованию методика подбора состава жаростойких бетонов ограничена пунктом 4.8 данных технологических требований, согласно которому бетонная смесь должна характеризоваться удобоукладываемостью Ж1–Ж4. Также в алгоритме расчета состава бетонной смеси, изложенном в Приложении 12 этого документа, для расчета коэффициента избытка цементного теста требуется показатель удобоукладываемости в секундах, что хорошо согласуется с текстом технологических требований и старой версией ГОСТ 20910, но малоприменимо для его последней редакции.

Похожий ряд проблем наблюдается в области подбора и применения составов жаростойких бетонов с мелкозернистой структурой. Текущее состояние рынка жаростойких бетонных смесей и актуальные научные исследования в области разработки новых жаростойких материалов показывают высокую востребованность мелкозернистых композиций [5, 10–12]. С точки зрения реологии мелкозернистые композиции предпочтительны для получения самоуплотняющихся бетонных смесей. Для жаростойких бетонов мелкозернистая структура также является фактором, способствующим улучшению термомеханических характеристик [13–16].

Фактически сегмент промышленно выпускаемых жаростойких бетонов, получаемых без использования крупного заполнителя, на данный момент весьма широк, а их применение технико-экономически обосновано. Тем не менее в положениях ГОСТ 20910–2019 отсутствует классификация жаростойких бетонов по структуре, а методика расчета, предусмотренная в технологических требованиях, не предусматривает алгоритм подбора состава жаростойкого бетона без крупного заполнителя. Также нормативные показатели деформативных характеристик бетонов, приведенные в сводах правил, регули-



Рис. 3. Смесь для жаростойкого бетона на основе вспученного вермикулита фракции менее 5 мм

Fig. 3. Mixture for heat-resistant concrete based on expanded vermiculite size less than 5 mm



Рис. 4. Поставка готовой сухой смеси для жаростойкого бетона на строительную площадку

Fig. 4. Delivery of dry mix for refractory concrete to the construction site

рующих область проектирования бетонных конструкций, эксплуатируемых в среде повышенной температуры (СП 27.13330.2017 и СП 52-110–2009), актуальны только для тяжелых бетонов, включающих крупный заполнитель. Так как реологические свойства бетона в большой степени зависят от его структуры, для мелкозернистых бетонов требуется проведение дополнительных исследований с целью определения реальных показателей их деформативных характеристик при работе в условиях высокой технологической температуры. Значительный объем таких исследований в последние годы проведен в институте УралНИИстром (рис. 2) [16].

Еще одним малоосвещенным в нормативной документации аспектом является применение в качестве заполнителей в жаростойких бетонах обожженных при высокой температуре горных пород – вспученных перлита и вермикулита. Уникальное сочетание низкой плотности и теплопроводности при достаточно высокой огнеупорности позволяет получать на основе этих заполнителей теплоизоляционные материалы, способные работать при воздействии повышенной температуры [17–19], в том числе жаростойкие бетоны. В стандарте ГОСТ 20910–2019 в классификации по виду заполнителя присутствуют перлитовые и вермикулитовые бетоны, а варианты их составов приведены в числе базовых рецептов в документах СП 52-110–2009, СП 27.13330.2017, Пособии по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенной и высокой температуры (к СНиП 2.03.04–84), и справочном пособии к СНиП 3.09.01–85 «Технология изготовления жаростойких бетонов». В последнем документе также изложены рекомендации по определению качества вспученного перлита и вермикулита. Исходя из требований действующего стандарта ГОСТ 12865–67, регламентирующего технические

характеристики вспученного вермикулита, данный материал подразделяется на три типа фракций: крупный – от 5 до 10 мм, средний – от 0,6 до 5 мм и мелкий – до 0,6 мм. Технические требования, предъявляемые к вспученному перлиту, изложены в стандарте ГОСТ 10832–2009 «Песок и щебень перлитовые вспученные». Согласно данному стандарту вспученный перлит подразделяется на песок в диапазоне фракций от менее 0,16 до 5 мм и на щебень в диапазоне фракций от 5 до 20 мм. Таким образом, в соответствии с требованиями к заполнителям, изложенными в ГОСТ 20910–2019, и Справочного пособия к СНиП 3.09.01–85 «Технология изготовления жаростойких бетонов» отдельные фракции вспученного перлита и вермикулита могут быть использованы в качестве крупного и мелкого заполнителей для жаростойких бетонов, а состав смеси может быть рассчитан в соответствии с методикой, изложенной в Приложении 12 Справочного пособия. Однако на практике в наибольшем числе современных исследований, направленных на разработку составов легких жаростойких бетонов на вспученном перлите и вспученном вермикулите, используют фракции до 5 мм (рис. 3) [20–23].

Таким образом, снова встает вопрос отсутствия востребованного задокументированного алгоритма расчета состава жаростойкого бетона без использования крупного заполнителя, а также возможности учета особенностей легких заполнителей, в частности их пористости, насыпной плотности и низкой прочности, затрудняющих процесс получения готовой к применению бетонной смеси с требуемыми физико-механическими характеристиками.

В новой версии методики подбора состава стоит также учесть особенности поведения заполнителей с плотностью зерен более 3 г/см³ (например, муллита, корунда), так как при их использовании в бетонных смесях повышенной подвижности повышается риск

возникновения седиментации и повышенной рас-
слаиваемости.

Следует отметить, что недостаточно охваченными нормативно-технической документацией остаются также широко распространенные и уже в достаточной мере исследованные фосфатные связующие [24–29]. В стандарте ГОСТ 20910–2019 присутствует классификация жаростойких бетонов по типу вяжущих, ограниченная портландцементом, алюминатными цементами и силикатными вяжущими. Упоминание о необходимости использования фосфатных связок встречается в документах СП 27.13330.2017 и СП 52-110–2009 в контексте их стойкости к углеродной и фосфорной газовой агрессивным средам. При этом немногочисленные базовые составы на основе фосфатных связующих остались лишь в числе «экспериментальных» и приведены только в справочном пособии к СНиП 3.09.01–85 «Технология изготовления жаростойких бетонов».

В настоящее время расширяется практика, когда сухая смесь в виде полуфабриката изготавливается на базе специализированных промышленных предприятий, затем поставляется на объекты в герметичной упаковке и затворяется непосредственно перед применением (рис. 4).

Такой подход позволяет обеспечить использование широкого диапазона сырьевых материалов, максимально оптимизировать зерновой состав и гарантировать стабильность составов, что бывает крайне сложно осуществить при изготовлении бетонных смесей на стандартных бетоносмесительных узлах.

Вместе с тем в нормативной базе на сегодняшний момент отмечается несогласованность в регламентировании процессов изготовления и контроля качества жаростойких бетонов, получаемых из сухих смесей. Согласно подп. 4.4.19 стандарта ГОСТ 20910–2019 смеси могут быть подразделены на готовые к употреблению и сухие по ГОСТ 7473. Однако данный стандарт после редакции 2010 г. не распространяется на сухие строительные смеси. Из действующих на данный момент нормативных документов, регламентирующих производство и контроль качества сухих бетонных смесей, для жаростойких бетонов может быть применен ГОСТ 31357–2017. В этом стандарте изложены актуальные технические требования и ссылки на методы испытаний сухих строительных смесей, в том числе бетонных, с наибольшей крупностью заполнителя, равной 20 мм, и диапазоном марок по удобоукладываемости от жестких до растекающихся, что согласуется с требованиями к сырьевым материалам, изложенными в ГОСТ 20910–2019.

Для обеспечения возможности производства и применения сухих смесей для жаростойких бетонов представляется необходимым в новую редакцию ГОСТ 20910 добавить ссылку на ГОСТ 31357. Кроме того, в текст стандарта ГОСТ 31357 необходимо добавить ссылку на ГОСТ Р 59714–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия».

Несмотря на отсутствие нормативных документов, в полной мере регулирующих производство и применение рассмотренных выше нестандартизированных типов смесей, они получили достаточно широкое распространение и промышленное внедрение. До внесения необходимых изменений в нормативно-техническую документацию в качестве основы для составления проектной документации в случае их применения можно использовать технические условия, разрабатываемые предприятием-изготовителем по согласованию с заказчиком и/или проектной организацией. Такой подход возможен и является доступным способом для внедрения новейших разработок в производство. Однако таким образом многократно расширяется перечень технических документов, область применения которых часто бывает локализована в пределах одного конкретного проекта, что может затруднять коммуникацию производителей, проектных и подрядных строительных организаций, а также организаций, впоследствии эксплуатирующих готовый объект. Кроме того, практическое внедрение составов конструкционных жаростойких бетонов без расчетного обоснования не обеспечивает гарантированную безопасность эксплуатации объектов, возведенных с их использованием [30]. Таким образом, является весьма актуальной разработка единой обновленной гармоничной нормативной базы, подкрепленной результатами исследований новых перспективных типов жаростойких бетонов.

Выводы

На основе анализа существующих нормативных документов, регулирующих процессы производства и эксплуатации жаростойких бетонов, можно сформулировать перечень мероприятий по доработке и расширению существующей в этой области нормативной базы.

Для обеспечения унификации широко используемых на практике нестандартизированных типов смесей для жаростойких бетонов, регламентирования процессов их получения и применения, а также устранения несоответствий между одновременно действующими документами необходимо:

1. Актуализировать положения ГОСТ 20910–2019:
 - обновить устаревшие нормативные ссылки или заменить их на более соответствующие по содержанию. В том числе обеспечить применение сухих смесей для жаростойких бетонов корректным регламентом, нормирующим процессы их производства и эксплуатации;
 - внести в текст документа классификацию с ранжированием бетонов по структуре в зависимости от крупности заполнителя;
 - в классификацию жаростойких бетонов по виду вяжущего добавить бетоны на фосфатных связующих, уточнив для них требования к материалам, техническим показателям и методам контроля;
 - разработать приложение, включающее алгоритм подбора состава бетонной смеси с широким

диапазоном марок по удобоукладываемости и с учетом возможности использования разных видов заполнителей (смеси крупных и мелких, только мелких, мелкофракционных легких на основе вспученных горных пород, огнеупорных заполнителей с высокой плотностью зерен) и фосфатных связующих. В ходе разработки приложения рекомендуется руководствоваться в том числе положениями из стандарта предприятия «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Основные требования при производстве работ» Госкорпорации Росатом (СТО 95 12071–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Основные требования при производстве работ»).

2. Дополнить своды правил, регулирующих процессы проектирования конструкций на основе жаростойких бетонов, данными для расчетов деформативных характеристик бетонов мелкозернистой структуры.

3. Для гармонизации всех аспектов нормативно-технической базы, регулирующей область производства и применения жаростойких бетонов в нашей стране, необходим также пересмотр ранее разрабо-

танных документов 30–40-летней давности (Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенной и высокой температуры (к СНиП 2.03.04–84) и Технология изготовления жаростойких бетонов (Справочное пособие к СНиП 3.09.01.85)), регламентирующих технологические требования к получению жаростойких бетонов, с учетом существующих апробированных современных решений в этих сферах.

Выполнение приведенных выше предложений позволит снизить количество нестыковок в действующих нормативных документах, а также легитимизировать результаты практического опыта и научных разработок, отвечающие современным требованиям производственных процессов. Актуальная нормативная база, включающая безусловно согласованные между собой документы, будет являться залогом обеспечения высокого качества материалов специального назначения, применяемых в ответственных отраслях промышленности, в том числе в области атомной энергетики.

Список литературы

1. Адамов Е.О., Першуков В.А. Проект «Прорыв». Десятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2016. Москва. 25–27 мая 2016. С. 13–14.
2. Патент РФ RU 2634426. Металлобетонный корпус ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем / Коротков Г.В., Сивков А.Н., Романов М.И., Зайцев Б.И., Ходасевич К.Б., Щекин М.В. Заявл. 09.08.2016. Оpubл. 30.10.2017.
3. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. Москва: МГУ, 2005. 45 с.
4. Ястребинский Р.Н., Дороганов В.А., Павленко В.И., Ястребинская А.В., Матюхин П.В., Евтушенко Е.И. Жаростойкий радиационно-защитный композиционный материал // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2014. № 7–8. С. 19–22.
5. Kalashnikov V., Kornienko P., Gorshkova L., Gaksheter G., Sarsenbayeva A. Development of compositions of self-compacting fine-grained refractory concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014. Vol. 12. No. 9, pp. 299–309. DOI: 10.3151/jact.12.299
6. Romano G.Q., Silva F.A., Toledo Filho R.D., Fairbairn E.M.R., Battista R.C. Mechanical characterization of steel fiber reinforced self-compacting refractory concrete. *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Belgium: RILEM Publications SARL Ghent. 2007, pp. 881–886.

References

1. Adamov E.O., Pershukov V.A. Breakthrough project. *Tenth International Scientific and Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy» MNTK-2016*. Moscow. May 25–27, 2016, pp. 13–14. (In Russian).
2. Patent RF RU 2634426 *Metallobetonnyj korpus yadernogo reaktora s zhidkometallicheskim teplonositelem* [Metal-concrete vessel of a nuclear reactor with a liquid-metal coolant]. Korotkov G.V., Sivkov A.N., Romanov M.I., Zaycev B.I., Hodasevich K.B., Shchekin M.V. Declared 09.08.2016. Published 30.10.2017. (In Russian).
3. Bekman I.N. *Yadernaya industriya* [Nuclear industry]. Moscow: Moscow State University named after M.V. Lomonosov. 2005. 45 p.
4. Yastrebinskiy R.N., Doroganov V.A., Pavlenko V.I., Yastrebinskaya A.V., Matyuhin P.V., Evtushenko E.I. Refractories radiation-protective composite material. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2014. No. 7–8, pp. 19–22. (In Russian).
5. Kalashnikov V., Kornienko P., Gorshkova L., Gaksheter G., Sarsenbayeva A. Development of compositions of self-compacting fine-grained refractory concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014. Vol. 12. No. 9, pp. 299–309. DOI: 10.3151/jact.12.299
6. Romano G.Q., Silva F.A., Toledo Filho R.D., Fairbairn E.M.R., Battista R.C. Mechanical characterization of steel fiber reinforced self-compacting refractory concrete. *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Belgium: RILEM Publications SARL Ghent. 2007, pp. 881–886.

7. Комаринский М.В., Смирнов С.И., Бурцева Д.Е. Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. Т. 11. № 38. С. 106–118.
8. Телешев В.И. Производство гидротехнических работ: Ч. 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. М.: Издательство АСВ, 2012. 448 с.
9. Комаринский М.В., Червова Н.А. Транспорт бетонной смеси при строительстве уникальных зданий и сооружений // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 1. С. 6–31.
10. Стефаненко И.В., Гнедаш Е.Е., Акчурин Т.К. Оптимизация гранулометрического состава заполнителей жаростойкого бетона мелкозернистой структуры // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. 2020. № 4. С. 205–213.
11. Корниенко П.В., Горшкова Л.В., Гакштетер Г.В. Опыт использования отходов металлургического производства в качестве компонентов жаростойких бетонов // *Технологии бетонов*. 2013. № 10. С. 29–33.
12. Гакштетер Г.В., Горшкова Л.В., Калашников В.И. и др. Эффективные высокопрочные и обычные бетоны. Пенза: Автономная некоммерческая научно-методическая организация «Приолжский Дом знаний», 2015. 148 с.
13. Тотурбиев Б.Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М.: Стройиздат, 1988. 203 с.
14. Стрелов К.К. Теоретические основы технологий огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1979. 180 с.
15. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
16. Ахтямов Р.Я., Ахтямов Р.Р., Ахмедьянов Р.М., Гамалий Е.А. Влияние соотношения размера заполнителей на термомеханические свойства жаростойких бетонов // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2021. № 4 (65). С. 32–40.
17. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2009. № 1–2. С. 58–64.
18. Бережной Ю.М., Романова О.Н., Бессарабов Е.Н. Перспективы использования вспененного модифицированного перлита для получения новых композиционных материалов // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1 (48). С. 133.
19. Неунывахина Д.Т., Фейлер С.В., Максимцов А.С., Чумов Е.П., Числавлев В.В. Разработка составов теплоизолирующих смесей для транспортировки жидкого чугуна. *XV Международный конгресс ста-*
7. Komarinskiy M.V., Smirnov S. I., Burceva D. E. Cast and self-compacting concrete mixes. *Stroitelstvo unikalnyh zdaniy i sooruzheniy*. 2015. Vol. 11. No. 38, pp. 106–118. (In Russian).
8. Teleshev V. I. Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot: Chast 1. Obshchie voprosy stroitel'stva. Zemlyanye i betonnye raboty [Production of hydraulic works: Part 1. General issues of construction. Earthworks and concrete works]. Moscow: ASV, 2012. 448 p.
9. Komarinskiy M.V., Chervova N.A. Concrete mix transport during the construction of unique buildings and structures. *Stroitelstvo unikalnyh zdaniy i sooruzheniy*. 2015. No. 1, pp. 6–31. (In Russian).
10. Stefanenko I.V., Gnedash E.E., Akchurin T.K. Optimization of the granulometric composition of fine-grained refractory concrete aggregates. *Vestnik of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2020. No. 4, pp. 205–213. (In Russian).
11. Kornienko P.V., Gorshkova L.V., Gakshteter G.V. Experience in the use of metallurgical production waste as components of heat-resistant concrete. *Tekhnologii betonov*. 2013. No. 10, pp. 29–33. (In Russian).
12. Gakshteter G.V., Gorshkova L.V., Kalashnikov V.I. Effektivnye vysokoprochnye i obychnye betony [Effective high-strength and ordinary concretes.]. Penza: Privolzhskij Dom znaniy. 2015. 148 p.
13. Toturbiev B.D. Stroitelnye materialy na osnove silikat-natrievykh kompozitsiy [Building materials based on silicate-sodium compositions]. Moscow: Stroyizdat. 1988. 203 p.
14. Strelov K.K. Teoreticheskie osnovy tekhnologij ognepornykh materialov [Theoretical foundations of technologies of refractory materials]. Moscow: Metallurgiya. 1979. 180 p.
15. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyaeva V.F. Tyazhelyi beton v usloviyah povyshennykh temperature [Heavy concrete at elevated temperatures]. Moscow: Stroyizdat. 1972. 128 p.
16. Akhtyamov R.Ya., Akhtyamov R.R., Akhmed'yanov R.M., Gamalii E.A. Influence of the size ratio of aggregates on the thermomechanical properties of heat-resistant concretes. *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi*. 2021. No. 4 (65), pp. 32–40. (In Russian).
17. Ahtyamov R.Ya. Vermiculite – raw material for the production of refractory heat-insulating materials. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2009. No. 1–2, pp. 58–64. (In Russian).
18. Berezhnoi Yu.M., Romanova O.N., Bessarabov E.N. Prospects for the use of foamed modified perlite for the production of new composite materials. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2018. No. 1 (48), p. 133. (In Russian).
19. Neunyvakhina D.T., Feiler S.V., Maksimtsov A.S., Chumov E.P., Chislavlev V.V. Development of compositions of heat-insulating mixtures for transportation of liquid iron. *XV International Congress of Steelworkers. Collection of works dedicated to the 100th anniversary of the National Research Technological*

- леплавильщиков: Сборник трудов к 100-летию Национального исследовательского технологического университета МИСиС и 380-летию российской металлургии. 2018. Т. 1. С. 344–349.
20. Хежев Т.А., Жуков А.З., Хежев Х.А. Огнезащитные и жаростойкие вермикулитобетонные композиты с применением вулканического пепла и пемзы // *Инженерный вестник Дона*. 2015. Т. 35. № 2–1. С. 43.
 21. ТУ 5767-004-21628872–2002 «Сухая смесь для жаростойкого бетона «ССВБ»».
 22. Патент SU1583396. Сырьевая смесь для изготовления легкого жаростойкого бетона / Шахов И.И., Позднякова Н.К., Хавкин А.Я. Заявл. 03.05.1988. Оpubл. 07.08.1990.
 23. Aslani F., Ma G. Normal and high-strength lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. Vol. 30. No. 12. 04018328. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002538)
 24. Кузьменков М.И., Плышевский С.В., Бычек И.В. Жаростойкие бетоны на основе вторичных огнеупоров и фосфатных связующих // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2005. № 6. С. 22–27.
 25. Хлыстов А.И., Широков В.А. Особенности применения фосфатных связок на основе нанотехногенного сырья в составах жаростойких бетонов. *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: Сборник статей* / под ред. К.С. Галицкова М.И. Бальзанникова. СГАСУ. Самара, 2015. С. 1435–1440.
 26. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование в производстве жаростойких бетонов алюмосодержащего нанотехногенного сырья и отходов углеобогащения // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1. С. 96–105.
 27. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Khort N.A., Gusarov S.V. Refractory materials based on secondary resources and phosphate compounds. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 59, pp. 579–582. <https://doi.org/10.1007/s11148-019-00276-3>
 28. Патент SU 697452. Сырьевая смесь для приготовления жаростойкого бетона / Ахтямов Р.Я., Абызов А.Н., Чернов А.Н., Иванов А.Г., Ивашников В.Т., Шляпников Б.С. Заявл. 06.07.1977. Оpubл. 15.11.1979.
 29. Абызов В.А., Абызов А.Н. Ячеистые жаростойкие бетоны на основе фосфатных связующих и заполнителей из отходов производства и переработки алюминия // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2015. № 4–5. С. 69–73.
 30. Кузнецова И.С., Титов М.Ю., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П. Актуализация свода правил по жаростойкому бетону // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018. № 4. С. 67–76.
 - University «MISiS» and the 380th anniversary of Russian metallurgy. 2018. Vol. 1, pp. 344–349. (In Russian).
 20. Hezhev T.A., Zhukov A.Z., Hezhev H.A. Fire-retardant and heat-resistant vermiculite-concrete composites using volcanic ash and pumice. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015. Vol. 35. No. 2–1, p. 43. (In Russian).
 21. TS 5767-004-21628872–2002. Dry mix for heat-resistant concrete «SSVB» (In Russian).
 22. Patent SU1583396. Syrevaya smes dlya izgotovleniya legkogo zharostojkogo betona [Raw mix for the manufacture of lightweight heat-resistant concrete]. Shahov I.I., Pozdnyakova N., Havkin A.Ya. Declared 03.05.1988. Published 07.08.1990. (In Russian).
 23. Aslani F., Ma G. Normal and high-strength lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. Vol. 30. No. 12. 04018328. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002538)
 24. Kuz'menkov M.I., Plyshevskii S.V., Bychek I.V. Heat-resistant concretes based on secondary refractories and phosphate binders. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2005. No. 6, pp. 22–27. (In Russian).
 25. Khlystov A.I., Shirokov V.A. Features of the use of phosphate binders based on nanotechnogenic raw materials in the composition of heat-resistant concretes. *Traditions and innovations in construction and architecture: collection of articles*. Ed. by Balzannikova M.I., Galitskova K.S. SGASU. Samara. 2015, pp. 1435–1440. (In Russian).
 26. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The use of aluminum-containing nanotechnogenic raw materials and coal enrichment waste in the production of heat-resistant concrete. *Stroitelstvo i rekonstrukciya*. 2021. No. 1, pp. 96–105. (In Russian).
 27. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Khort N.A., Gusarov S.V. Refractory materials based on secondary resources and phosphate compounds. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 59, pp. 579–582. <https://doi.org/10.1007/s11148-019-00276-3>
 28. Patent SU 697452 Syrevaya smes dlya prigotovleniya zharostojkogo betona [Raw mix for preparation of heat-resistant concrete]. Ahtyamov R.Ya., Abyzov A.N., Chernov A.N., Ivanov A.G., Ivashinnikov V.T., Shlyapnikov B.S. Declared 06.07.1977. Published 15.11.1979. (In Russian).
 29. Abyzov V.A., Abyzov A.N. Cellular heat-resistant concretes based on phosphate binders and aggregates from aluminum production and processing waste. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2015. No. 4–5, pp. 69–73. (In Russian).
 30. Kuznetsova I.S., Titov M.Yu., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P. Updating the set of rules for heat-resistant concrete. *Vestnik of the Research Center for Construction*. 2018. No. 4, pp. 67–76. (In Russian).

Н.С. СОКОЛОВ^{1,2}, канд. техн. наук, директор (ns_sokolov@mail.ru);
С.Н. СОКОЛОВ², директор ООО «Строитель Форст»,
А.Н. СОКОЛОВ², директор по строительству (forstnpf@mail.ru)

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр., 15)

² ООО НПФ «ФОРСТ» (428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Калинина, 109а)

Технология устройства монолитного железобетонного ростверка в стесненных условиях функционирующего объекта

Проблема освоения подземного пространства в стесненных условиях существующих производств является сложной геотехнической задачей и требует специфического подхода. Зачастую при реконструкции возникает настоятельная необходимость применения заглубленных железобетонных конструкций с целью сохранения объектов в работоспособном состоянии. При этом наличие слабых инженерно-геологических элементов существенно усугубляет проведение геотехнических работ. Вопросы повышения несущей способности основания железобетонных фундаментов всегда находятся под пристальным вниманием геотехников, проектировщиков и строителей. Использование буринъекционных свай, устраиваемых с использованием нестандартных физических процессов, в большинстве случаев успешно решает многие сложные и нетипичные геотехнические проблемы.

Ключевые слова: бетон, геотехническое строительство, электрогидравлика, монолитный железобетонный ростверк, буринъекционные сваи ЭРТ, стесненные геотехнические условия.

Для цитирования: Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Технология устройства монолитного железобетонного ростверка в стесненных условиях функционирующего объекта // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 12–16.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-12-16>

N.S. SOKOLOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering), Director (ns_sokolov@mail.ru);

S.N. SOKOLOV², Director, LLC "Stroitel Forst"; A.N. SOKOLOV², Director for construction (forstnpf@mail.ru)

¹ Chuvash State University named after I.N. Ulyanov (15, Moskovsky prospect, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, Russian Federation)

² LLC NPF "FORST" (109a, Kalinina Street, Cheboksary, 428000, Chuvash Republic, Russian Federation)

Technology for The Installation of a Monolithic Reinforced Concrete Grillage in Cramped Conditions of a Functioning Facility

The problems of developing underground space in the cramped conditions of existing industries is a complex geotechnical task and requires a specific approach. At the same time, the presence of weak engineering-geological elements significantly aggravates the geotechnical work. Increasing the bearing capacity of foundation bases is always under the close attention of geotechnicians, designers and builders. The use of bored-injection piles, arranged using non-standard physical processes, in most cases successfully solves many complex and atypical geotechnical problems.

Keywords: geotechnical construction, electro-hydraulics, monolithic reinforced concrete grillage, ERT bored injection piles, constrained geotechnical conditions.

For citation: Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. Technology for the installation of a monolithic reinforced concrete grillage in cramped conditions of a functioning facility. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 12–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-12-16>

Строительству зданий и сооружений в стесненных условиях инженеры-строители, инженеры-геотехники, инженеры-проектировщики всегда уделяют пристальное внимание [1–5]. Особенно такое строительство вызывает неподдельный интерес при возведении объектов внутри функционирующего технологического процесса как сооружение нового здания, дополняющего его [6–13].

В настоящей статье приведен удачно реализованный геотехнический пример вставки объекта. На рис. 1 приведен поясняющий поперечный разрез промышленного каркаса с указанием встраиваемых объектов в эксплуатируемое промышленное сооружение. Использование электроразрядной геотехнической технологии при устройстве буринъекционных свай позволяет гармонично устраивать заглубленные железобетонные конструкции в выше-названных условиях [14–15].

По результатам выполненных инженерно-геологических изысканий площадка строительства относится к III категории сложности грунтовых условий. В геоморфологическом отношении территория изысканий приурочена к северной части Приволжской возвышенности – Чувашскому плато и находится на водораздельной поверхности между безымянными притоками долин р. Малый Цивиль и р. Ута. Инженерно-геологическое строение площадки строительства до исследованной бурением глубины (18 м) представлено мощной толщей четвертичных отложений техногенного (*tQh*) и элювиально-делювиально-го генезиса (*edQh-p*). В гидрогеологическом отношении площадка до исследованной бурением глубины 18 м характеризуется наличием одного безнапорного водоносного горизонта подземных вод, вскрытого во всех скважинах и приуроченного к четвертичным насыпным грунтам ИГЭ № 1 и кровле трещиноватых

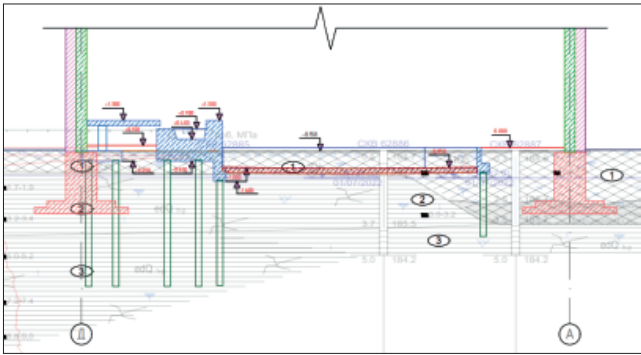


Рис. 1. Поперечный разрез промышленного железобетонного каркаса с указанием встраиваемых объектов в эксплуатируемое сооружение
Fig. 1. Cross section of an industrial reinforced concrete frame with an indication of the built-in objects in the operating structure

элювиально-делювиальных глин ИГЭ № 2. Водопором для водоносного горизонта служат нижележащие более плотные слои глины ИГЭ № 2, 3.

Конструктивная схема встраиваемого объекта в существующий эксплуатируемый корпус представляет собой:

1. ФМ-1. Монолитная железобетонная конструкция, состоящая из перекрытия, стенки, колонн, свайных фундаментов, фундаментов под печь.

2. ФМ-2. Монолитный железобетонный фундамент под бункеры. Основание свайное, поверху буроналивных свай ЭРТ объединено монолитным железобетонным ростверком.

3. Монолитные железобетонные подпорные стенки ПС-1, ПС-2 уголкового типа на свайном основании.

В качестве заглубленных строительных железобетонных конструкций использованы «микросваи» вертикальные сплошного сечения диаметром бурения 300 мм, армированные на всю высоту пространственными арматурными каркасами. Принятая маркировка свай: Ср-13-30 (длина 13 м, буровой диаметр 300 мм); Ср-15-30 (длина 15 м, буровой диаметр 300 мм); Ср-16-30 (длина 16 м, буровой диаметр 300 мм); Ср-17-30 (длина 17 м, буровой диаметр 300 мм). Анкеровка (арматурный выпуск из головы сваи) в монолитный железобетонный ростверк (плиту) составляет 400 мм, а заделка головы (железобетонный оголовок) сваи в железобетонный ростверк (плиту) – 50 мм.

Последовательность устройства буроналивных свай ЭРТ следующая:

1. Для буроналивных свай ЭРТ использовались самоуплотняющиеся мелкозернистые бетонные смеси класса по прочности В25, марка по водонепроницаемости не ниже W4 в соответствии с ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», приготовленные на строительной площадке или на специализированных бетонных заводах.

2. Бетонная смесь должна соответствовать требованиям ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия».

3. Удобноукладываемость бетонной смеси П4–П5 проверяется по конусу АЗНИИ.

4. Водоотделение бетонной смеси не более 2%.

5. Бетонная смесь не должна иметь включений щебня и гравия размером более 10 мм.

6. Для бетонных смесей использовать портландцемент без минеральных добавок марки по прочности не ниже М500.

7. Заполнителем для бетона служит кварцевый песок. Допускается применение чистых мелких песков с модулем крупности не менее 1,7.

8. При изготовлении буроналивных свай допускается использовать следующие добавки: суперпластификаторы, ускорители твердения, замедлители схватывания, ингибиторы коррозии и противоморозные добавки.

9. Вода для бетонной смеси водопроводная и техническая, не содержащая сахаров и фенолов более 10 мг/л, нефтепродуктов и жиров. Водородный показатель (*pH*) от 4 до 12,5.

10. Запрещается добавлять в мелкозернистую бетонную смесь воду для увеличения ее подвижности.

11. Подбор состава бетонной смеси с определением состава и количества добавок выполняется строительной лабораторией.

12. Армирование свай предусмотрено на всю длину и выполняется отдельными секциями из пространственных сварных арматурных каркасов. Соединение каркасов между собой выполняется внахлестку с помощью вязальной проволоки.

13. В качестве продольных стержней пространственного арматурного каркаса принята: арматура диаметром 18 мм класса А500С; поперечное армирование из арматуры диаметром 10 мм класса А240. Защитный слой бетона не менее 30 мм.

14. Жесткость пространственного каркаса обеспечивается стальными кольцами из труб диаметрами по 159 мм с толщиной стенки не менее 4 мм.

15. Для обеспечения защитного слоя бетона предусмотрены центраторы из стальных полос шириной по 20 мм, толщиной 4 мм в количестве не менее трех в одном поперечном сечении пространственного арматурного каркаса с шагом по длине каркаса не более 2 м.

16. Ручная дуговая сварка элементов пространственного каркаса между собой осуществляется электродами типа Э42А, Э46А, Э50А.

17. Для изготовления сварных пространственных арматурных каркасов применять арматуру из стали марки 35ГС запрещается.

Примечания:

1. Анкеровка (арматурный выпуск из головы сваи) в железобетонную плиту 400 мм.

2. Заделка головы (железобетонный оголовок) сваи в железобетонную плиту 50 мм.

3. Обмазка поверхности строительных конструкций, заглубленных в грунт, битумной мастикой за два раза по праймированному основанию.

18. Бетон тяжелый классов по прочности В20, В25, марка по водонепроницаемости не ниже W4,

морозостойкость F100, удобоукладываемость бетонной смеси П4–П5, проверяется осадкой конуса АЗНИИ.

19. Осадка конуса бетонной смеси не менее 21 см, крупность заполнителя (гранитный щебень) не более 40 мм.

20. Устройство фундаментов выполнять на подготовке из бетона класса В7,5 толщиной 100 мм.

21. Армирование конструкций производится отдельными стержнями или каркасами. Продольная и поперечная арматура класса А500С. В местах стыковки арматурных стержней выполняется внахлест величиной, равной 50 диаметрам арматуры. Защитный слой бетона для рабочей арматуры не менее 40 мм.

22. На всех остальных пересечениях соединения осуществлять с помощью вязальной проволоки.

23. Ручная дуговая сварка арматуры между собой осуществляется электродами типа Э42А, Э46А, Э50А.

Последовательность устройства монолитных железобетонных ростверков по оголовкам буронаблюдательных свай ЭРТ следующая:

1. При разработке котлована под монолитные железобетонные конструкции для исключения возможности попадания в него поверхностных вод на основании требований поз. 1.3 СНиП 3.01.01–85 «Организация строительного производства» в составе подготовительных работ необходимо выполнить временный водоотвод со строительной площадки посредством планировки территории площадки, обеспечивающий их быстрый отток с помощью постоянных или временных устройств в соответствии с требованиями СНиП 3.02.01–87 «Земляные сооружения, основания и фундаменты».

2. Перед бетонированием конструкций горизонтальные поверхности должны быть очищены от мусора, грязи, масел, снега и льда, цементной пленки и др. Непосредственно перед укладкой бетонной смеси очищенные поверхности должны быть промыты водой и просушены струей воздуха.

3. Бетонную смесь следует укладывать горизонтальными слоями без технологических разрывов с направлением в одну сторону.

4. При невозможности непрерывного бетонирования допускается устройство рабочих швов с местоположением их по согласованию с авторами рабочего проекта. Контактные поверхности следует очистить от цементной пленки. Цементную пленку следует удалять, как правило, сразу после окончания схватывания цемента (в жаркую погоду через 6–8 ч после окончания укладки, в прохладную – через 12–24 ч). Очистка бетонной поверхности от цементной пленки должна производиться без повреждения поверхности бетона, прочность бетона должна быть в пределах 0,2–0,3 МПа при обработке воздушной струей и 1,5–2,5 МПа при механической обработке металлической щеткой. Для удаления цементной пленки с поверхности бетона запрещается пользоваться ударными инструментами (отбойными молотками, перфораторами, бетоноломами и т.д.).



Рис. 2. Фрагмент выпусков буронаблюдательных свай ЭРТ
Fig. 2. Fragment of releases of EDT bored injection piles



Рис. 3. Фрагмент готовой монолитной железобетонной конструкции под монтаж надфундаментных конструкций и оборудования
Fig. 3. A fragment of a finished monolithic reinforced concrete structure for the installation of above-foundation structures and equipment

Подготовленную к укладке бетонной смеси поверхность затвердевших рабочих швов непосредственно перед продолжением бетонирования следует обмазать коллоидным клеем М400 (В/Ц не более 0,35) толщиной не более 5 мм.

5. Бетонную смесь уплотняют вибраторами до прекращения оседания и появления на поверхности блеска цементного теста.

6. Запрещается использовать бетонную смесь, потерявшую удобоукладываемость. Добавление воды для повышения подвижности не допускается.

7. При уплотнении бетонной смеси не допускается опирание вибраторов на арматуру и закладные изделия, тяжи и другие элементы крепления опалубки. Глубина погружения глубинного вибратора в мелкозернистую бетонную смесь должна обеспечивать углубление его в ранее уложенный слой на 5–15 см. Шаг перестановки глубинных вибраторов не должен превышать полуторного радиуса их действия, для поверхностных вибраторов должен обеспечивать перекрытие на 100 мм площадкой вибратора границы уже провибрированного участка.

8. В начальный период твердения бетон необходимо защищать от попадания атмосферных осадков или потерь влаги, в последующем поддерживать температурно-влажностный режим с созданием условий, обеспечивающих нарастание его прочности.

9. Мероприятия по уходу за бетоном, порядок и сроки их твердения, контроль за их выполнением и

сроки распалубки конструкций должны устанавливаться ППР.

10. Движение людей по забетонированным строительным конструкциям и установка опалубки вышележащих строительных конструкций допускаются после достижения бетоном прочности не менее 1,5 МПа.

Список литературы

1. Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2012. № 2. С. 17–20.
2. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. СПб.: Геореконструкция, 2010. 551 с.
3. Ilichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S., Bulgakov L.A. Deformations of the Retaining Structures Upon Deep Excavations in Moscow. *Proc. Of Fifth Int. Conf on Case Histories in Geotechnical Engineering*. April 3–17. New York. 2004, pp. 5–24.
4. Ilichev V.A., Nikiforova N.S., Koreneva E.B. Computing the evaluation of deformations of the buildings located near deep foundation tranches. *Proc. of the XVI European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering*. Madrid. Spain. 24–27 September 2007. Vol. 2, pp. 581–585.
5. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Прогноз изменения температурного состояния основания здания в условиях потепления климата // *Жилищное строительство*. 2021. № 6. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-6-18-24>
6. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. Geotechnical cut-off diaphragms for built-up area protection in urban underground development. *The pros, of the 7th Int. Symp. «Geotechnical aspects of underground construction in soft ground»*. 16–18 May. 2011. tc28 IS Roma. AGI. 2011, № 157NIK.
7. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. The use of cut off of different types as a protection measure for existing buildings at the nearby underground pipelines installation. *Proc. of Int. Geotech. Conf. dedicated to the Year of Russia in Kazakhstan*. Almaty, Kazakhstan, 23–25 September 2004, pp. 338–342.
8. Petrukhin V.P., Shuljatjev O.A., Mozgacheva O.A. Effect of geotechnical work on settlement of surrounding buildings at underground construction. *Proceedings of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Prague, 2003.
9. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О. Взаимодействие нефилтующей щебеночной сваи (колонны) с окружающим консолидирующим грунтом и ростверком в составе свайно-плитного фундамента // *Жилищное строительство*. 2019. № 4. С. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-4-19-23>
10. Соколов Н.С., Соколов А.Н., Соколов С.Н., Глушков В.Е., Глушков А.Е. Расчет буринъекци-

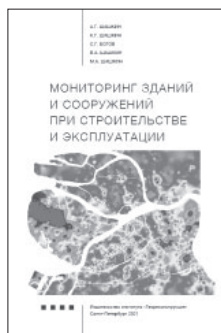
11. Засыпку пазух изготовленных конструкций мерзлым грунтом выполнять не допускается.

На рис. 2 и 3 приводятся реально выполненные выпуски (оголовки) буринъекционных свай ЭРТ, а также фрагмент монолитного железобетонного ростверка по оголовкам свай ЭРТ.

References

1. Ilichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Experience of development of russian megacities underground space. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2012. No. 2, pp. 17–20. (In Russian).
2. Ulickij V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G. Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov [Geotechnical Support of Urban Development]. Saint Petersburg: Georeconstruction, 2010. 551 p.
3. Ilichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S., Bulgakov L.A. Deformations of the Retaining Structures Upon Deep Excavations in Moscow. *Proc. Of Fifth Int. Conf on Case Histories in Geotechnical Engineering*. April 3–17. New York. 2004, pp. 5–24.
4. Ilichev V.A., Nikiforova N.S., Koreneva E.B. Computing the evaluation of deformations of the buildings located near deep foundation tranches. *Proc. of the XVI European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering*. Madrid. Spain. 24–27 September 2007. Vol. 2, pp. 581–585.
5. Ilichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of changes in the temperature state of the building base in climate warming. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 6, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-6-18-24>
6. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. Geotechnical cut-off diaphragms for built-up area protection in urban underground development. *The pros, of the 7th Int. Symp. «Geotechnical aspects of underground construction in soft ground»*, 16–18 May, 2011. tc28 IS Roma, AGI, 2011, № 157NIK.
7. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. The use of cut off of different types as a protection measure for existing buildings at the nearby underground pipelines installation. *Proc. of Int. Geotech. Conf. dedicated to the Year of Russia in Kazakhstan*. Almaty, Kazakhstan, 23–25 September 2004, pp. 338–342.
8. Petrukhin V.P., Shuljatjev O.A., Mozgacheva O.A. Effect of geotechnical work on settlement of surrounding buildings at underground construction. *Proceedings of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Prague, 2003.
9. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O. The interaction of non-filtering crushed stone pile (column) with the surrounding consolidating soil and plate in the pile-slab foundation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 4, pp. 19–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-4-19-23>
10. Sokolov N.S., Sokolov A.N., Sokolov S.N., Glushkov V.E., Glushkov A.E. Calculation of flight

- онных свай повышенной несущей способности // *Жилищное строительство*. 2017. № 11. С. 20–26.
11. Соколов Н.С. Технологические приемы устройства буронаблюдения свай с множественными уширениями // *Жилищное строительство*. 2016. № 10. С. 54–57.
 12. Sokolov N.S., Viktorova S.S. Method of aligning the lurches of objects with large-sized foundations and increased loads on them // *Penodico Tche Quimica*. 2018. January. Vol. 15, pp. 1–11.
 13. Соколов Н.С., Петров М.В., Иванов В.А. Проблемы расчета буронаблюдения свай, изготовленных с использованием разрядно-импульсной технологии. *Материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» (НАСКР-2014)*. 2014. г. Чебоксары. С. 415–420.
 14. Соколов Н.С., Рябинов В.М. Об эффективности устройства буронаблюдения свай с множественными уширениями с использованием электродно-импульсной технологии // *Геотехника*. 2016. № 2. С. 28–32.
 15. Тер-Мартirosian А.З., Кивлюк В.П., Исаев И.О., Шишкина В.В. Анализ расчетных предпосылок геотехнического прогноза нового строительства на окружающую застройку // *Жилищное строительство*. 2022. № 9. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-57-66>
11. Sokolov N.S. Technological Methods of Installation of Bored-Injection Piles with Multiple Enlargements. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 11, pp. 20–26. (In Russian).
 12. Sokolov N.S., Viktorova S.S. Method of aligning the lurches of objects with large-sized foundations and increased loads on them. *Penodico Tche Quimica*. 2018. January. Vol. 15, pp. 1–11.
 13. Sokolov N.S., Petrov M.V., Ivanov V.A. Calculation problems the buroinjeksionnykh of the piles made with use of digit and pulse technology. *Materials of the 8th All-Russian (the 2nd International) the «New in Architecture, Designing of Construction Designs and Reconstruction» conference (NASKR-2014)*. 2014. Cheboksary, pp. 415–420. (In Russian).
 14. Sokolov N.S., Ryabinov V. M. About efficiency of the device the buroinjeksionnykh of piles with multi-seater broadenings with use of electro-digit technology. *Geotechnica*. 2016. No. 2, pp. 28–32. (In Russian).
 15. Ter-Martirosian A.Z., Kivluik V.P., Isaev I.O., Shishkina V.V. Analysis of the calculated prerequisites for the geotechnical forecast of new construction on the surrounding buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 9, pp. 57–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-57-66>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Авторы: А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов, В.А. Шашкин, М.А. Шашкин
(практическое руководство под редакцией д.г.-м.н. Шашкина А.Г.)
Санкт-Петербург: Георекострукция, 2021. 640 с.

В монографии раскрывается содержание мониторинга механической безопасности при новом строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений. Показывается значение мониторинга не только как средства контроля за сохранностью городской застройки, но и как профилактического средства, позволяющего своевременно обнаружить и диагностировать негативные тенденции и принять адекватные меры по нормализации технического состояния сооружения. Отмечается необходимость построения мониторинга как интерактивного процесса, базирующегося на компьютерной модели взаимодействия сооружения и основания. Это позволяет корректно интерпретировать результаты мониторинга, а также выполнять обратные расчеты для совершенствования исходных расчетных схем и физических моделей материалов и грунтов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

E-mail: geoconstruction@gmail.com WWW: geo-bookstore.ru

**Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»**

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г., Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.
Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.

По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»

УДК 666.973

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-17-24>

О.И. МАТВЕЕВА¹, канд. техн. наук (matveeva_oi@mail.ru);
 Н.К. БАИШЕВ², аспирант (nbaishev@gmail.com), А.В. ФЁДОРОВ², аспирант (crawltrick@gmail.com);
 И.Р. ПАВЛЮКОВА³, инженер (pavlyukova-irina@mail.ru);
 А.Л. ПОПОВ², канд. техн. наук (surrudin@gmail.com)

¹ ООО «ЯкутПНИИС-Коммерческий Центр» (677000, Якутск, ул. Дзержинского, 20)

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (677000, Якутск, ул. Кулаковского, 50)

³ АО «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства» (677000, Якутск, ул. Дзержинского, 20)

Легкий пористый заполнитель из модифицированной цеолитщелочной шихты

Рассматривается вопрос повышения качества легкого пористого заполнителя из цеолитщелочной шихты – пеноцеолита. Экспериментально подтверждена возможность использования технического порошкообразного лигносульфоната (ЛСТ) в качестве модификатора шихты. Показано, что при добавлении ЛСТ в шихту пеноцеолита в количестве 5% происходит повышение плотности заполнителя на 75% и прочности при сдвиге в цилиндре в три раза. Улучшение характеристик связано с клеящей способностью активных сульфатных групп в ЛСТ, которые связывают тонкодисперсный сыпучий материал шихты, что обеспечивает равномерное вспучивание. Получена опытная партия пеноцеолита с показателями качества: марка по насыпной плотности – М500, марка по прочности – П125, водопоглощение – 10,9%, что удовлетворяет нормируемым значениям по ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия», а также отвечает требованиям ГОСТ 25820–2021 «Бетоны легкие. Технические условия» для конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов.

Ключевые слова: легкий бетон, пеноцеолит, заполнитель пористый, шихта, лигносульфонат.

Для цитирования: Матвеева О.И., Баишев Н.К., Фёдоров А.В., Павлюкова И.Р., Попов А.Л. Легкий пористый заполнитель из модифицированной цеолитщелочной шихты // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 17–24.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-17-24>

O.I. MATVEEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (matveeva_oi@mail.ru); N.K. BAISHEV², Graduate Student (nbaishev@gmail.com);

A.V. FEDOROV², Graduate Student (crawltrick@gmail.com); I.R. PAVLYUKOVA³, Engineer (pavlyukova-irina@mail.ru);

A.L. POPOV², Candidate of Sciences (Engineering) (surrudin@gmail.com)

¹ YakutPNIS-Commercial Center OOO (20, Dzerzhinsky Street, Yakutsk, 677000, Russian Federation)

² North-Eastern Federal University (50, Kulakovskogo Street, Yakutsk, 677000, Russian Federation)

³ Yakutsk State Design, Research Institute of Construction JSC (20, Dzerzhinsky Street, Yakutsk, 677000, Russian Federation)

Light Porous Aggregate from a Modified Composition of Zeolite-Alkali Batch

The article touches upon the issue of improving the quality of light porous aggregate from zeolite-alkaline batch – foam zeolite. The possibility of using technical powdered lignosulfonate as a batch modifier has been experimentally confirmed. It is shown that when lignosulfonate is added to the zeolite foam batch in an amount of 5%, the filler density increases by 75% and the compressive strength in the cylinder increases by 3 times. The improvement is due to the active excitation of sulfate groups in the lignosulfonate, which cause a finely dispersed bulk material of the batch, which causes rapid swelling. An experimental batch of foam zeolite was obtained with quality indicators: bulk density grade – M500, strength grade – P125, water absorption – 10.9%, which satisfies the normalized standard values according to GOST 32496–2013, and also meets the requirements of GOST 25820–2021 for structural and structural-heat-insulating lightweight concrete.

Keywords: light porous aggregate, batch, foam zeolite, lignosulfonate, density, strength, water absorption, lightweight concrete.

For citation: Matveeva O.I., Baishev N.K., Fedorov A.V., Popov A.L. Light porous aggregate from a modified composition of zeolite-alkali batch. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 17–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-17-24>

Опыт применения легких бетонов в условиях арктического и субарктического климата Якутии неоднозначен. С одной стороны, высокая энергоэффективность ограждающих конструкций из таких видов легких бетонов, как пенобетон и газобетон, является безусловным преимуществом, однако они ввиду высокой материалоемкости технологии производства и нестабильного качества широкого применения в Якутии к настоящему времени не получили. Активно применяемые во времена СССР легкие бетоны на основе керамзита в качестве заполнителя со временем вытеснены техническими решениями из двухслойных ограждающих конструк-

ций (тяжелый бетон + эффективный утеплитель), которые обладают более высокой несущей способностью, но и теплотехнической неоднородностью конструкций из-за теплопроводных включений. В 70–80-е гг. XX в. в республике широко использовались керамзит и легкие керамзитобетонные конструкции и изделия. В Якутске, Мирном, Тикси действовали промышленные предприятия по выпуску керамзита и легких стеновых материалов, изделий и конструкций. Имеется опыт эффективного многолетнего применения однослойных стен толщиной от 45 до 60 см из керамзитобетонных панелей, крупных блоков с однородными теплотехниче-

скими характеристиками. Тепловизионными обследованиями зданий с однослойными стенами из крупных керамзитобетонных блоков показано, что отсутствие теплопроводных связей, большая толщина стен исключают мостики холода и обеспечивают перепады между температурой на внутренней поверхности наружных стен и температурой внутреннего воздуха в пределах нормативных значений. Установленные фактические данные указывают, что для строительства жилых, общественных и производственных зданий в условиях арктического и субарктического климата Якутии технология легких бетонов с пористыми заполнителями остается весьма актуальной. Особенности этой технологии определяют высокие сроки службы получаемых изделий и технико-экономические показатели за счет менее материалоемкой технологии производства строительных изделий на основе пористого заполнителя по сравнению с пено- и газобетоном.

В работах современных научных школ и исследователей показано, что при разработке энергоэффективных бетонов важно отталкиваться от доступности и генетической подготовленности применяемого сырья к активному взаимодействию с продуктами гидратации цемента [1–7]. Возможности применения уникальных свойств природных цеолитов Сибири в производстве различных строительных материалов активно изучали в Томском политехническом университете, Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Иркутском государственном университете транспорта, Киевском национальном университете строительства и архитектуры и Тамбовском государственном технологическом университете [8–14].

Большинство современных исследований предполагают применение природных цеолитов в качестве минеральных добавок в вяжущие [15–17]. Так, например, было установлено, что добавление в цемент до 20% цеолитовой породы, состоящей в основном из гейландита, практически не снижает прочности цементного камня за счет высокой пуццолановой активности, способствующей раннему формированию цементоподобных гидратированных продуктов, таких как C_3S (белит) и $C-S-H$ -гель.

К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению физико-механических и теплофизических свойств легких бетонов на стекловидных пористых заполнителях, разработаны эффективные заполнители для легких бетонов с повышенным содержанием стеклофазы, которые открывают новые возможности улучшения всего комплекса свойств легких бетонов и конструкций из них. К перспективным стекловидным заполнителям с частично или полностью аморфизированной структурой зерна относятся: гранулированное пеностекло, гранулированная пеностеклокерамика и другие аналогичные заполнители с закрытой ячеистой структурой и насыпной плотностью менее 250 кг/м^3 [18–25].

В 2019 г. предприятие по добыче и обогащению природного цеолита ООО «Сунтарцеолит» начало выпускать легкий пористый заполнитель из цеолит-щелочной шихты (далее – пеноцеолит) на основе природного цеолита месторождения «Хонгуруу» по технологии, разработанной АО «ЯкутПНИИС». Пеноцеолит представляет собой насыпной пористый материал ячеистого строения с закрытой пористостью в виде гранул округлой формы (гравия), имеющего среднюю насыпную плотность от 150 до 350 кг/м^3 . Технология производства пеноцеолита подразумевает формирование гранул из смеси тонкомолотого природного цеолита с водным раствором $NaOH$, с последующим обжигом при температуре $680–850^\circ\text{C}$ [18, 19]. Однако испытаниями, выполненными испытательным центром АО «ЯкутПНИИС», установлено, что выпускаемый пеноцеолит обладает высокой открытой пористостью, повышенным водопоглощением (до максимальных допустимых значений), это ограничивает область его применения в качестве стеновых материалов для малоэтажного и каркасного домостроения (ГОСТ 32496–2013). Согласно ГОСТ 25820–2021 пористый заполнитель с приведенными выше качественными характеристиками может применяться в конструкционно-теплоизоляционных легких бетонах с марками по плотности D700, D800, D900, с классами по прочности при сжатии от B2,5 до B5, с маркой по морозостойкости не ниже F125. С целью расширения области применения пеноцеолита для изготовления несущих слоев многослойных ограждающих несущих железобетонных конструкций (стеновые панели) и несущих железобетонных конструкций для малоэтажного строительства (стены, перемычки, плиты покрытия и перекрытия) требуется улучшить качественные характеристики пеноцеолита – повысить марку по насыпной плотности и по прочности при сжатии, понизить водопоглощение заполнителя [26, 27].

Для достижения поставленной цели проведена работа по изучению способов оптимизации (модификации) состава шихты и улучшения свойств пеноцеолитового пористого заполнителя для конструкционно-теплоизоляционного бетона с заданными свойствами. Учитывая пластифицирующие свойства химических добавок, их доступность и стоимость, в качестве модификаторов выбраны следующие компоненты:

– лигносульфонат технический порошкообразный (ЛСТП по ТУ 2455-028-00279580–2014), который является смесью натриевых солей лигносульфоновых кислот (с примесью редуцирующих и минеральных веществ), получаемых из щелоков бисульфитной варки целлюлозы (далее – ЛСТ);

– масла индустриальные отработанные (далее – МИО), которые являются смесью переработанных нефтепродуктов, утративших в процессе использования эксплуатационные свойства и слитых из рабочих систем, соответствующие требованиям ГОСТ 21046–2021 «Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия».

Оптимизацию, модификацию состава шихты проводили на основе следующих компонентов:

- натр едкий технический (ГОСТ Р 55064–2012 «Натр едкий технический. Технические условия»);
- цеолитовый порошок, получаемый на первом технологическом переделе в цехе ООО «Сунтар-цеолит».

Были приготовлены 36%-й водный раствор едкого натра и 40%-й водный раствор ЛСТ, концентрация растворов контролировалась с помощью измерения плотности (табл. 2).

Из данных компонентов была приготовлена контрольная шихта – состав 1, соответствующая заводскому составу из цеолитового порошка с формовочной влажностью 31,3%, и экспериментальные составы 2–4 (табл. 3). Шихта готовилась ручным перемешиванием в сферической чаше. Были оценены пластические свойства шихт, предел пластичности, предел текучести и число пластичности (ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»).

Согласно полученным данным заводской состав 1 шихты обладает формовочной влажностью вне границ пластичности. На основе анализа ранее выполненных исследований изучено влияние модифицирования шихты с помощью корректирующих добавок на пластические свойства шихт. Приготовлена шихта состава 3 с добавлением ЛСТ в количестве 5%. Испытания показали снижение предела пластичности до 27,5% и повышение числа пластичности до 7,6 соответственно против 35,64% и 5,4 для контрольного состава 1.

Другим эффективным модификатором сырьевой шихты служат отработанные масла и смазочно-охлаждающие жидкости, которые могут быть использованы в керамических массах в качестве выгорающей добавки, повышающей коэффициент вспучивания и прочность агрегатов и снижающей затраты на тепловую энергию при сушке за счет более форсированных режимов термообработки сырца и при обжиге за счет снижения температуры вспучивания. Также добавление отработанных масел, не подлежащих регенерации, в шихту керамических масс является отличным способом их дешевой утилизации. В связи с этим на основе анализа литературы было решено добавлять МИО в состав компонентов корректирующей добавки, улучшающей вспучивающиеся и прочностные свойства сырца. В настоящих исследованиях была апробирована проба отработанного масла, отобранная на Якутской нефтебазе АО «Саханефтегазбыт» и соответствующая требованиям ГОСТ 21046–2015. Таким образом была приготовлена шихта состава 4 с добавлением МИО в количестве 5% при формовочной влажности 31,3%. Испытания не выявили изменения пластических свойств, напротив, возникает нестабильность формы шихты, что очевидно связано с гидрофобностью масла. Нерастворенные частички масла в шихте нарушают целостность теста, получить стабильные по-

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний цеолитового порошка
Zeolite powder test results

Показатель	Маркировка	Требования ТУ 23.99.19-001- 23297907-2020	Фактические значения
Тонкость помола по остатку на сите № 025, %	МП-1	Не более 10	57,2
Влажность, %	МП-1	Не более 4	5,1

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний водных растворов добавок
Test results of aqueous solutions of additives

Показатель	Фактические значения
Плотность раствора NaOH, г/мл	1,39
Плотность ЛСТ, г/мл	1,2

Таблица 3
Table 3

Свойства шихты в зависимости от состава
The properties of the batch depending on the composition

Показатель	Значение показателя		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Содержание цеолитового порошка, %	85	85	85
Содержание NaOH, %	15	10	10
Содержание ЛСТ, %	–	5	–
Содержание МИО, %	–	–	5
Формовочная влажность, %	31,3	31,3	31,3
Верхний предел пластичности, %	40,95	35,1	–*
Нижний предел пластичности, %	35,64	27,5	–*
Число пластичности, %	5,4	7,6	–*

Примечание. * Изменения пластических свойств не выявлено. Свойства нестабильные.

Таблица 4
Table 4

Режимы сушки и обжига сырцов пеноцеолита различных составов
Modes of drying and firing raw foam glass of various compositions

Условия термической обработки	Термоподготовка	Обжиг
Температура, °C	300	900 и ниже с интервалом 20
Время выдержки, мин	20	10

казатели шихт по ГОСТ 5180–2015 оказалось труднодостижимым.

Были проведены испытания по изучению влияния состава шихты и температуры обжига на среднюю плотность зерен пеноцеолита для уточнения оптимального расхода едкого натра в сырьевой смеси. Максимальная температура обжига назначалась с 900°C при постепенном понижении температуры

**Таблица 5
Table 5**

**Влияние содержания NaOH на среднюю плотность зерен пеноцеолита
Influence of NaOH content on the average grain density of foam glass**

Температура	Заводские гранулы	Содержание NaOH в составе, %			Содержание NaOH + ЛСТ в составе, %		Содержание NaOH + МИО в составе, %	
		15	12,5	10	12,5+2,5	10+5	12,5+2,5	10+5
Средняя плотность зерен, г/см ³								
300 (термоподготовка)	1,77	1,57	2,1	1,95	1,63	1,46	1,73	1,68
960	-	-	-	Неуст. пена	-	0,65	0,61	0,46
940				0,84	-	0,75	0,52	0,47
920				Неуст. пена	0,77	-	0,84	0,54
900	Неуст. пена	Неуст. пена	0,39	0,98	0,57	0,9	0,58	0,64
880	0,4	0,31	0,38	1,02	0,47	0,99	0,63	0,64
860	0,42	0,35	0,45	1,07	0,53	1,21	0,68	0,75
840	0,47	0,42	0,45	1,06	0,68	1,37	0,63	0,83
820	0,46	0,43	0,59	≥1,1	0,74	≥1,37	0,73	≥0,83
800	0,64	0,45	0,57	-	0,86	-	≥0,8	-
780	0,67	0,44	0,63		-	-	-	-
760	0,76	0,5	0,64		-	-	-	-
740	0,73	0,5	0,62		-	-	-	-
720	0,97	0,54	0,69		-	-	-	-

**Таблица 6
Table 6**

**Насыпная плотность и прочность заполнителей, модифицированных разными добавками
Bulk density and strength of foam glass modified with various additives**

Состав	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя плотность зерна в песке, г/см ³	Сдавливающая нагрузка в цилиндре (10 мм погружения), кН		Прочность на сдвливание в цилиндре, МПа	
Заводской NaOH – 15	0,24	0,38	2,73	2,9	0,62	0,66
NaOH – 12,5	0,32	0,75	3,8	4,11	0,86	0,93
NaOH + ЛСТ – 12,5 + 2,5	0,29	0,59	3,96	4,78	0,9	1,08
NaOH + ЛСТ – 10 + 5	0,42	0,89	7,51	8,11	1,7	1,84
NaOH + МИО – 12,5 + 2,5	0,28	0,58	3,89	4,29	0,88	0,97
NaOH + МИО – 10 + 5	0,28	0,51	3,19	3,46	0,72	0,78

**Таблица 7
Table 7**

**Свойства пеноцеолита из модифицированной цеолитщелочной шихты (ЛСТ 5% + NaOH 10%)
Properties of foam glass from a modified composition of zeolite-alkali batch (Lignosulfonate technical, 5% + NaOH, 10%)**

Показатель	Единица измерения	Требования ГОСТ 32496–2013	Фактические показатели	Оценка соответствия ГОСТ 32496–2013
Прочность при сдвливании в цилиндре (марка по прочности)	МПа	св. 2,5 до 3,3 (П125)	2,63	Соответствует
Средняя плотность зерен	кг/м ³	-	1006	Не нормируется
Насыпная плотность (марка по насыпной плотности)	кг/м ³	450–500 (M500)	483 (M500)	Соответствует
Водопоглощение (по массе)	%	25	10,9	Соответствует

обжига с интервалом 20°С до температуры, когда средняя плотность гранул становилось более 0,8 г/см³. Для образцов, характеризующихся недостаточной вспучиваемостью, температура обжига поднималась выше 900°С с интервалом 20°С вверх до температуры, при которой в гранулах проявлялась неустойчивая пена.

Изготовление сырьевых гранул выполнено с использованием 36% водного раствора едкого натра

(NaOH) 36%-й концентрации (плотность раствора 1,38 г/мл), модифицирующей добавки в виде водного раствора ЛСТ 36%-й концентрации (плотность раствора 1,38) и добавки МИО в исходном виде. Полученная шихта загружалась в лабораторный ручной шнековый смеситель с рабочим объемом 200 мл и с плоской матрицей для формования гранул диаметром отверстий 7 мм. При выходе из гранулятора

отформованные сырцовые гранулы для придания зернам сырца требуемой формы дополнительно обрезаются по длине вручную.

Режимы сушки и обжига сырцов принимают согласно заводским условиям производства пеноцеолита (табл. 4).

Сырцовые гранулы подвергались термоподготовке в сушильном шкафу 20 мин при температуре 300°C. После выдержки сырцы перемешались в разогретую до рабочей температуры муфельную печь, где выдерживались 10 мин.

Результаты обжига показали (табл. 5), что имеется возможность снижения расхода NaOH до 12,5%, а также снижение себестоимости пористого заполнителя при уменьшении расхода дорогостоящего компонента без снижения качественных характеристик продукции.

При добавлении корректирующей добавки ЛСТ в состав шихты отмечена пластификация смеси, что позволяет понизить формовочную влажность. В данном случае не отмечается образования характерной полости внутри гранул и крупных пор, что обусловлено меньшим расходом воды при приготовлении сырцовой массы за счет пластифицирующего действия ЛСТ. Активные сульфатные группы ЛСТ связывают тонкодисперсный сыпучий материал, проявляя тем самым клеящую способность, что снижает возникающие напряжения в результате тепломассообмена [28].

Снижение количества крупных пор можно заметить и в зернах пеноцеолита с добавлением корректирующей добавки МИО. В данном случае механизм можно объяснить тем, что частички отработанного масла интенсифицируют тепло- и массообмен в гранулах, тем самым снижая градиент температуры [29]. Таким образом испарение воды происходит более равномерно по всей грануле, и крупные макропоры не образуются.

Для приведенных составов пеноцеолита выполнены испытания пористых заполнителей разных составов по определению насыпной плотности заполнителей и прочности при сдавливании в цилиндре по ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний» (табл. 6). Ввиду получения небольших объемов партий лабораторных образцов заполнителя оценочное определение прочности при сдавливании проводилось в цилиндре диаметром $d=70$ мм с величиной погружения плунжера 10 мм.

По результатам оценочных испытаний определено, что модифи-

цирование шихты добавкой ЛСТ в количестве 5% и при дозировке едкого натра 10% существенно повышает насыпную плотность пеноцеолита и прочность пористого заполнителя. Так, при увеличении насыпной плотности заполнителя с 240 до 420 кг/м³ (рост плотности на 75%) увеличивается его прочность при сдавливании в цилиндре почти в три раза. Также отмечается, что пластифицирующая способность ЛСТ повышает пластичность сырцовой массы: сырец получается более ровным, гладким, без задигов. Однако при этом наблюдалось налипание сырцовой массы на поверхности смесителя при перемешивании и слипание отдельных гранул, что указывает на необходимость корректировки формовочной влажности и на обязательное включение технологического передела – опудривание сырцовых гранул перед загрузкой их в сушильный барабан печи.

Согласно оценочным испытаниям добавление МИО в состав шихт позволяет частично заменить порообразователь в виде едкого натра. Экспериментально показано: замена 5% едкого натра на такое же количество МИО в составе шихты приводит к снижению коэффициента вспучивания с 4,4–5 до 2,6–3,4, или на 34–41%. Применение МИО позволит несколько улучшить вспучиваемость, но не позволяет эффективно заменить содержание NaOH. Кроме того, при предварительной сушке сырцовых гранул и последующем их обжиге выделяются продукты сгорания нефтепродуктов, значительно ухудшающие условия производства заполнителя; ухудшается огневая безопасность процессов сушки и обжига пено-

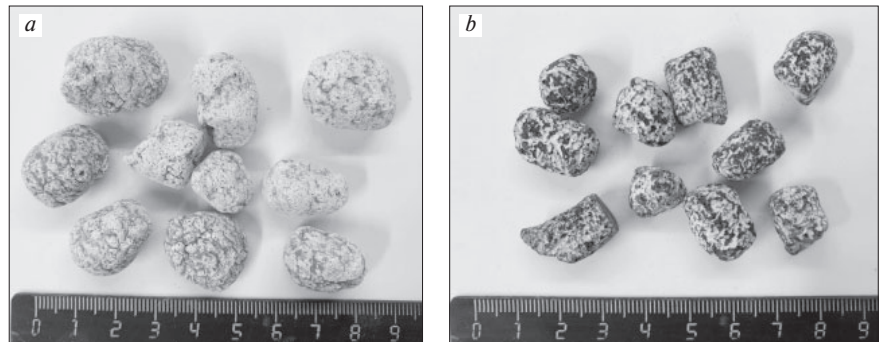


Рис. 1. Пеноцеолит стандартного заводского состава (а) и опытного состава (б)
 Fig. 1. Foam glass of standard factory composition (a) and experimental composition (b)

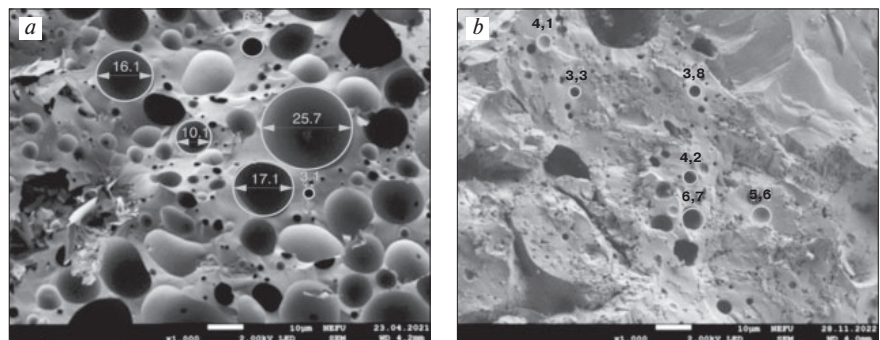


Рис. 2. Микроструктура пеноцеолита стандартного заводского состава (а) и опытного состава (б)
 Fig. 2. Microstructure of foam glass of standard composition (a) and experimental composition (b)

цеолита. Несмотря на то что применение МИО могло бы удешевить технологию производства пористого заполнителя пеноцеолита и создать технологию утилизации нефтепродуктов, не подлежащих регенерации, дальнейшие экспериментальные исследования решено прекратить.

Проведены испытания по определению характеристик заполнителя на основе подготовленной более крупной лабораторной серии образцов пеноцеолита с дозировкой ЛСТ 5% и формовочной влажностью 26,8% (табл. 7).

Свойства пеноцеолита, модифицированного комплексом (ЛСТ, 5% + NaOH, 10%), определялись по ГОСТ 9758–2012. Результаты, представленные в табл. 7, показали значительное улучшение качества пеноцеолита и достижение заданных показателей:

- марка по насыпной плотности пеноцеолита соответствует М500;
- марка по прочности пеноцеолита соответствует П125;
- водопоглощение пеноцеолита составило 10,9%.

Полученные показатели качества превышают нормируемые стандартные значения по ГОСТ 32496–2013, а также отвечают требованиям ГОСТ 25820–2021 для конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов.

Образцы пеноцеолита опытного состава относительно стандартного состава обладают в среднем более меньшими размерами зерна и пор (рис. 1, 2). Ввиду наличия выгорающей органической добавки образцы имеют черный окрас по всему телу. Поверхность оболочки образцов белая, так как покрыта опудривателем (каолин).

Сравнительный анализ микроструктурных особенностей морфологии поверхности пеноцеолита проводился с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-7800F с использованием супергидридной объективной линзы (СОЛ) в учебно-научно-технологической лаборатории «Технология полимерных наноконструкций» в Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова.

Пеноцеолит опытного состава, как и ожидалось, имеет сравнительно меньше крупных пор (рис. 2, *b*), чем у контрольного заводского цеолита (рис. 2, *a*). Если у образцов контрольного пеноцеолита основная часть пор распределена по размерам 5–25 мкм с преобладанием крупных пор (более 10 мкм), то у образцов опытного состава, судя по снимкам, поры в основном распределены в диапазоне размеров от 1 до 10 мкм. При этом общее количество пор у опытного состава пеноцеолита значительно меньше.

Выводы

1. Изучено влияние модифицирования шихты с помощью корректирующих добавок на пластичные свойства шихты. Добавление ЛСТ в количестве 5% позволяет снизить пределы пластичности на 14–23% и расширить границы пределов на 41,7%, что должно

повысить плотность и понизить водопоглощение пеноцеолита. Добавление МИО в состав шихты позволяет снизить пределы пластичности на 14–23% и расширить границы пределов на 41,7%.

2. Результаты испытаний по определению интенсивности вспучивания сырьевой шихты с различным составом показали следующее: зерна пеноцеолита без добавок после обжига имели характерную полость внутри гранул в виде крупной поры, обусловленную неравномерной дегидратацией минеральных компонентов в сырце.

3. При добавлении корректирующей добавки ЛСТ в состав шихты отмечена пластификация смеси, что позволяет понизить формовочную влажность и решить проблему образования характерных крупных полостей внутри гранул и крупных пор. При этом пластификация происходит за счет активных сульфатных групп в ЛСТ, связывающих тонкодисперсный сыпучий материал, проявляя тем самым клеящую способность шихты и нивелируя возникающие напряжения при тепломассообменных процессах при сушке и обжиге гранул. При этом происходит существенное повышение плотности (рост плотности на 75%) и прочности при сдвиге в цилиндре (почти в три раза).

4. Применение МИО позволяет частично заменить порообразователь в виде едкого натра, однако рост прочности незначителен с 0,66 до 0,97 МПа. Кроме того, при сушке и при обжиге выделяются продукты сгорания нефтепродуктов, значительно ухудшающие условия производства заполнителя; ухудшается огневая безопасность процессов сушки и обжига пеноцеолита.

5. Обжиговые исследования показали, что снижение дозировки NaOH до 10% значительно ухудшает вспучиваемость сырцовых гранул. При содержании NaOH до 12,5% вспучиваемость сырцовых гранул понижается незначительно, что указывает на возможность получения более высоких показателей качества при модификации сырьевой смеси.

6. Получена опытная партия ПЦГ с показателями качества: марка по насыпной плотности – М500; марка по прочности – П125; водопоглощение – 10,9%, что удовлетворяет нормируемым стандартным значениям по ГОСТ 32496–2013, а также отвечает требованиям ГОСТ 25820–2021 для конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов. Полученные показатели качества пеноцеолита расширяют область его применения в качестве легкого заполнителя для легких конструкционных бетонов с классами бетона по прочности В10–В15, достаточных для производства крупноразмерных наружных стеновых панелей.

Список литературы / References

1. Matos P.R. de, Foiato M., Prudêncio L.R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compact-

- ing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203, pp. 282–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074>
2. Ricklefs A. Thermal conductivity of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104, pp. 71–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.013>
 3. Ovcharenko G., Ibe E. The role of aluminum and iron hydroxides in the formation of concrete properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030. No. 1. DOI 10.1088/1757-899X/1030/1/012023
 4. Nelubova V.V. The composition and properties of autoclaved gas concrete with amorphized raw modifiers. *Materials and Technologies in Construction and Architecture II*. 2020. Vol. 974, pp. 142–148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.142>
 5. Volodchenko A.N., Nelyubova V.V. Reactivity of the clay component of rocks at the incomplete stage of mineral formation to lime during autoclave processing. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 95, pp. 86–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_13
 6. Фролова М.А., Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Алюмосиликатное вяжущее на основе сапонитсодержащих отходов алмазодобывающей промышленности // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 68–70. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-68-70>
 6. Frolova M.A., Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S. An aluminum-silicate binder on the basis of saponite-containing waste of diamond industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 68–70. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-68-70>
 7. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Карпушенкова Л.С., Карпушенков С.А. Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50>
 7. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Karpushenkova L.S., Karpushenkov S.A. Porous ceramic material based on clay and waste of production of granite rubble. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50>
 8. Казанцева Л.К., Юсупов Т.С., Лыгина Т.З. и др. Пеностекло из механоактивированных бедных цеолитсодержащих пород // *Стекло и керамика*. 2013. № 10. С. 18–22.
 8. Kazantseva L.K. et al. Foam glass from mechanoactivated zeolite-poor rock. *Steklo i Keramika*. 2014. Vol. 70. No. 9–10, pp. 360–364. (In Russian).
 9. Panina T.I. Efficiency of application of complex nanomodifying additives based on zeolites in building materials. *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2016. Vol. 8. No. 5, pp. 116–132.
 10. Казанцева Л.К. Особенности изготовления пеностекла из цеолитщелочной шихты // *Стекло и керамика*. 2013. № 8. С. 3–7.
 10. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch. *Steklo i Keramika*. 2013. Vol. 70. No. 7–8, pp. 277–281. (In Russian).
 11. Смирнская В.Н., Верещагин В.И. Перспективы использования цеолитовых пород Сибири в силикатных материалах // *Стекло и керамика*. 2002. Т. 75. № 12.
 11. Smirenskaya V.N., Vereshchagin V.I. Prospects of using zeolite rocks of Siberia in silicate materials. *Steklo i Keramika*. 2002. Vol. 59. No. 11–12, pp. 414–419.
 12. Gainanova A.A. New composites based on zeolites (H-Beta, H-ZSM-5) and nanosized titanium(IV) oxide (anatase and η-phase) doped by Ni, Ag, V with photocatalytic, adsorption and bactericidal properties. *New Journal of Chemistry. Royal Society of Chemistry*. 2021. Vol. 45. No. 5, pp. 2417–2430. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0NJ04286B>
 13. Лесовик П.В. Комплексное использование хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов // *Горный журнал*. 2004. № 1. С. 76–77.
 13. Lesovik R.V. Integrated use of tailings of wet magnetic separation of ferruginous quartzites. *Gornyi Zhurnal*. 2004. Vol. 1, pp. 76–77. (In Russian).
 14. Ortega-Guerrero M.A., Carrasco-Núñez G. Environmental occurrence, origin, physical and geochemical properties, and carcinogenic potential of erionite near San Miguel de Allende, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*. 2014. Vol. 36. No. 3, pp. 517–529. DOI: 10.1007/s10653-013-9578-z
 15. Perraki T. The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32. No. 2, pp. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.004>
 16. Trung N.T. Reduction of cement consumption by producing smart green concretes with natural zeolites. *Smart Structures and Systems*. 2019. Vol. 24. No. 3, pp. 415–425. DOI: 10.12989/ss.2019.24.3.415
 17. Boháč M. Properties of cement pastes with zeolite during early stage of hydration. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 151, pp. 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.349>
 18. ТУ 23.99.19-001-23297907–2020. Пеноцеолит гранулированный. Технические условия.
 18. TU 23.99.19-001-23297907–2020. Penozeolit granulirovannyj. Tekhnicheskie usloviya [Penozeolite granulated. Specifications] (In Russian).
 19. Патент RU (11) 2 723 886(13) С1. Способ изготовления гранулированного пеностеклокерамического заполнителя.
 19. Patent RU (11) 2 723 886(13) C1. Sposob izgotovleniya granulirovannogo penosteklokeramicheskogo zapolnitelya [Method for manufacturing granular foam-glass-ceramic filler] (In Russian).

20. Иванов К.С. Применение цеолитов Якутии для получения гранулированного теплоизоляционного материала // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 8. 160–167.
20. Ivanov K.S. Application of zeolites of Yakutia to obtain granulated heat-insulating material. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2021. Vol. 332. No. 8, pp. 160–167. (In Russian).
21. Иванов К.С. Структурообразование в системе $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--H}_2\text{O}$ при синтезе пеностеклокерамики экструзионным методом // *Неорганические материалы*. 2019. Т. 55. № 3. С. 304–310.
21. Ivanov K.S. Structure formation in the $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--H}_2\text{O}$ system during the synthesis of foam glass ceramics by the extrusion method. *Neorganicheskie materialy*. 2019. Vol. 55, No. 3, pp. 304–310. (In Russian).
22. Иванов К.С. Влияние методов подготовки силикат-натриевой смеси на формирование структуры пеностеклокерамики // *Физика и химия стекла*. 2019. Т. 45. № 1. С. 65–73.
22. Ivanov K.S. Influence of methods of preparation of silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foamed glass ceramics. *Fizika i himiya stekla*. 2019. Vol. 45. No. 1, pp. 65–73. (In Russian).
23. Орлов А.Д. Оптимизированная одностадийная технология гранулированного пеностекла на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы // *Строительные материалы*. 2015. № 1. С. 24–26.
23. Orlov A.D. Optimization of one-stage technology of granulated foam glass on the basis of low-temperature synthesis of glass phase. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 1, pp. 24–26. (In Russian).
24. Орлов А.Д., Нежиков А.В. Пеностеклокерамика как наполнитель высокотехнологичных легких бетонов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2017. № 14. С. 163–171.
24. Orlov A.D., Nezhikov A.V. Foam-glass-ceramics as a filler for high-tech lightweight concretes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2017. No. 14, pp. 163–171 (In Russian).
25. Орлов А.Д. Пеностеклокерамика из минерального сырья: новая одностадийная технология «Термогран» на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы и ее перспективы // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2014. № 11. С. 40–45.
25. Orlov A.D. Foam glass ceramic from mineral raw materials: the new one-stage Thermogran technology based on low-temperature synthesis of glass phase and its prospects. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2014, pp. 42–43 (In Russian).
26. Баишев Н.К., Матвеева О.И., Попов П.М., Семенов К.В. Оценка энергоэффективности жилого дома с различными вариантами конструкций стен с применением стеновых блоков из легкого цеолитобетона. *Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение [Электронный ресурс]: Сборник избранных научных трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию создания строительного комплекса Якутии*, г. Якутск, 5–6 октября 2021 г. Киров: Изд-во МЦИТО, 2022.
26. Baishev N.K., Matveeva O.I., Popov P.M., Semenov K.V. Evaluation of the energy efficiency of a residential building with various wall designs using lightweight zeolite concrete wall blocks. *Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource saving [Electronic resource]: a collection of selected scientific papers based on the materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the creation of the construction complex of Yakutia*. Yakutsk, October 5–6, 2021 of the year. Kirov: MCITO Publishing House, 2022. (In Russian).
27. Ведяков И.И., Васкалов В.Ф., Малявский Н.И., Ведяков М.И. Пеностеклокерамическая теплоизоляция – эффективное решение для жилищного строительства на арктических и субарктических территориях. *Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение [Электронный ресурс]: Сборник избранных научных трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию создания строительного комплекса Якутии*, г. Якутск, 5–6 октября 2021 г. Киров: Изд-во МЦИТО, 2022.
27. Vedyakov I.I., Vaskalov V.F., Malyavsky N.I., Vedyakov M.I. Foam-glass-ceramic thermal insulation is an effective solution for housing construction in the Arctic and subarctic territories. *Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource saving [Electronic resource]: a collection of selected scientific papers based on the materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the creation of the construction complex of Yakutia*. Yakutsk, October 5–6, 2021 of the year. Kirov: MCITO Publishing House, 2022. (In Russian).
28. Фирстов А.П. Выбор лигносульфонатов при различных способах варки для использования их в литейном производстве // *Евразийское Научное Объединение*. 2021. № 3–1 (73). С. 105–108.
28. Firstov A.P. The choice of lignosulfonates for various methods of cooking for their use in foundry. *Evrzjiskoe Nauchnoe Obedinienie*. 2021. No. 3–1 (73), pp. 105–108 (In Russian).
29. Абдрахимов В.З., Белякова Е.А., Денисов Д.Ю. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге легковесного кирпича // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2011. № 1–2. С. 49–53.
29. Abdrakhimov V.Z., Belyakova E.A., Denisov D.Yu. Investigation of heat and mass transfer processes during firing of lightweight bricks. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2011. No. 1–2, pp. 49–53. (In Russian).

Инновационные материалы КНАУФ для преобразования современного мегаполиса

По приглашению компании КНАУФ спустя семь лет вернулись в Пермь, которая в нынешнем году отмечает 300-летний юбилей. Материалы компании КНАУФ широко используются частными и государственными организациями в улучшении облика города, совершенствовании городской среды и улучшении комфорта жителей.

В 2023 году Перми исполнилось 300 лет. Это значимое событие как для города и его жителей, так и для других регионов, потому что с Пермью связаны важные моменты российской истории, искусства, спорта, науки. Подготовка к празднованию стала отправной точкой для больших изменений в облике города, комфорте и качестве жизни.

К 300-летию юбилею город преобразуется: проводятся масштабные работы по обновлению главных улиц, ремонтируются фасады домов, прокладывается новая городская магистраль, строятся новые социально значимые объекты – школы и больницы, а также современные удобные, комфортные и безопасные жилые комплексы.

Пермский край входит в зону ответственности Уральской сбытовой дирекции КНАУФ, в которую входит 19 регионов РФ. Широкий ассортимент поставляемых продуктов обеспечивают шесть производственных предприятий КНАУФ в городах Челябинске, Чапаевске (Самарская область), Кунгуре (Пермский край), Звенигово (Республика Марий Эл), Чебаркуле (Челябинская область) и Тюмени. В ассортимент производимой продукции входят гипсовые строительные плиты, гипсоволокнистые листы, разнообразные гипсовые и цементные сухие строительные смеси, готовые к применению составы и полимерные шпаклевки, минераловатная изоляция, металлический профиль, а также уникальный продукт импортозамещения – высокопрочная гипсовая безусадочная смесь для заделки стыков гипсокартонных листов КНАУФ-Унихард (производится в Чапаевске Самарской области).

Пермский край занимает пятое место по обороту продукции КНАУФ в зоне ответственности Уральской сбытовой дирекции – около 7%, уступая только Свердловской области (примерно 21%), Татарстану (18%), Челябинской (10,5%) и Тюменской областям (9%).

В Пермском крае в первом квартале 2023 г. было введено 499 тыс. м² жилья. Данные Росстата свидетельствуют о росте продаж недвижимости в России в целом после небольшого спада. С учетом этих данных компания КНАУФ поддерживает свои производственные мощности на должном уровне и расширяет ассортимент выпускаемых материалов.

Для жилищного строительства решающими показателями являются скорость возведения конструкций и качество получаемых поверхностей (помещений). Оба критерия удовлетворяются при применении межкомнатных гипсокартонных перегородок. Технологии сухого строительства в целом позволяют ускорить и оптимизировать данный процесс, повысив его технологичность,



Директор Уральской сбытовой дирекции филиала ООО «Кнауф гипс» И.С. Третьяков (слева) и руководитель службы корпоративных коммуникаций группы КНАУФ Россия и Беларусь Л.М. Лось

при этом получая эстетически безупречные, красивые ровные поверхности, а также обеспечение хорошей звукоизоляции и благоприятного микроклимата в помещении.

Материалы и технологии компании КНАУФ активно используются в реализации проектов практически всех регионов нашей страны. Конечно, Пермь не исключение. Мы посетили наиболее интересные и значимые городские объекты, где использована продукция КНАУФ.

В устройстве межкомнатных перегородок в квартирах новых домов, а также для создания огнестойких облицовок в жилых комплексах различных классов в Перми применяются каркасно-обшивные системы КНАУФ. Применение данных технологий позволяет создать внутри помещений акустический комфорт уровня лучших мировых пятизвездочных отелей. Главные преимущества каркасно-обшивных систем КНАУФ: сокращение сроков строительства, возможность увеличения площади за счет уменьшения толщины стен при сохранении всех требуемых характеристик, небольшой вес в сравнении с альтернативными вариантами, что в том числе дает возможность сократить расходы на фундамент и перекрытия.

Наличие квалифицированных кадров является залогом грамотного и эффективного применения строительных материалов. С первых лет работы в России компания КНАУФ уделяет особое внимание подготовке и обучению специалистов, создавая специальные программы на базе Академии КНАУФ, организуя курсы повышения квалификации, проводя различные конкурсы и т. д.

Современный технологичный дом SPACE комфорт-класса компании NOVA

По проекту жильцам представлена возможность создать «личный микрокосмос»: будут реализованы решения умного дома; создана сквозная безопасность (вход в лобби по Face Id; ip-видеодомофоны); реализуется улучшенная шумоизоляция, а также самостоятельное управление климатом.

Основное внимание обращено на комфорт и безопасность проживания.

Внутренние перегородки квартир выполнены с двухслойными обшивками из КНАУФ-листов на одинарном металлическом каркасе С 112.

Для обеспечения выполнения норм пожаробезопасности в местах путей эвакуации применены материалы с классом пожарной опасности КМ-0: КНАУФ-суперлист, Сапфир, Аквапанель.

Объемы поставленных материалов:

КНАУФ-лист – 40 тыс. м²;

КНАУФ-профиль – 60 тыс. п. м;

Сапфир-лист – 4 тыс. м²;

Аквапанель – 2,5 тыс. м².



Акустический комфорт и экологичность важны для человека не только в собственной квартире, но и в тех помещениях, где он проводит время, особенно когда находится в уязвимом состоянии. В отделке внутренних помещений строящейся **поликлиники** на ул. Ленина в Перми использовались перегородки из гипсоволокнистых листов (КНАУФ-суперлист) в два слоя, которые обеспечивают очень хорошую звукоизоляцию при соблюдении требований по пожарной безопасности (материал относится к категории НГ).

Фасад поликлиники необычный, сложной формы. Выполнен при помощи навесной фасадной системы Аквапанель с последующей отделкой декоративной штукатуркой Диамант. Санузлы выделены с помощью комбинированных перегородок: со стороны собственно санузла – Аквапанель, со стороны сухих помещений – гипсоволокнистый лист. Использованы штукатурные гипсовые смеси КНАУФ, в том числе МН Старт и гипсоволокнистые листы, выпускаемые на предприятии «КНАУФ Гипс Челябинск»; профили и гипсокартон – с предприятия «КНАУФ Гипс Кунгур»; Аквапанель – из г. Новомосковска (Тульская обл.); изоляционные материалы (Тюмень), КНАУФ Инсулейшн и др.

Объемы поставленных материалов:

КНАУФ-суперлист – 20 тыс. м²;

КНАУФ-профиль – 40 тыс. п. м;

Аквапанель – 3,6 тыс. м².





Жилой комплекс бизнес-класса «Премьер» компания «Пермь-Девелопмент»

Особенностями концепции данного жилого комплекса являются: закрытый двор без машин; все секции зданий объединены стилобатом; есть подземный паркинг на 220 машино-мест, а также надземные парковки, что в общей сложности удовлетворяет требованиям по обеспеченности машино-местами.

Первая очередь сдана в 2022 г. (в настоящее время все квартиры проданы), срок сдачи второй очереди – четвертый квартал 2023 г.

На территории двора сделано разноуровневое озеленение, высажены кустарники, поставлены детские комплексы.

Межкомнатные перегородки в ЖК смонтированы из гипсокартона, что позволило создать идеальные внутренние поверхности, а также наилучшую звукоизоляцию; на путях эвакуации применялись негорючие плиты КНАУФ-Файерборд.

Объемы поставленных материалов:

КНАУФ-лист – 80 тыс. м²; КНАУФ-профиль – 120 тыс. п. м; КНАУФ-суперлист – 15 тыс. м²; негорючие плиты КНАУФ-Файерборд – 1,5 тыс. м².



Проект социального пространства «Завод Шпагина» (фото с сайта <https://lms-construction.ru/proekti/zdanie-permskoy-gosudarstvennoy-hudozhestvennoy-galerei-perm>)



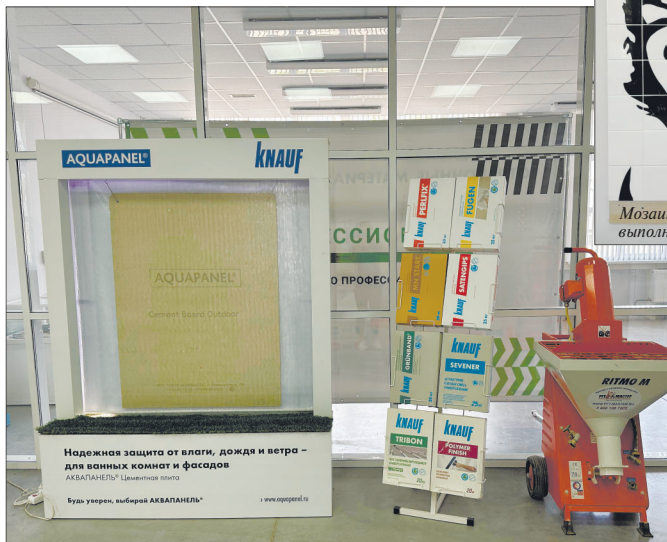
Одной из культурно-значимых точек строительства является новое здание **Пермской художественной галереи**, которая станет частью социокультурного пространства «Завод Шпагина». Также идет восстановление корпусов бывшего завода, которые войдут в единый комплекс галереи. В них также откроют кафе и детский кластер, где планируют проводить творческие занятия для детей и выставки поделок. Здание галереи будет занимать площадь более 20 тыс. м², что в семь раз превышает площадь пространства, которое сейчас галерея занимает в Спасо-Преображенском соборе. Планируется, что на новых площадях выставят большинство экспонатов имеющейся коллекции, их уже начали готовить к переезду.

К зданиям такого типа предъявляются очень жесткие требования по безопасности, а также специфические требования по качеству внутренней среды, так как в галерее обязательно должен соблюдаться специальный температурно-влажностный режим. Со всеми этими задачами справляются материалы КНАУФ – негорючие плиты КНАУФ-Аквапанель и КНАУФ-Файерборд, которые позволяют создать безопасную среду как для посетителей и музейных работников, так и для экспонатов. По данным главы Уральской сбытовой дирекции КНАУФ И.С. Третьякова, на данный объект было поставлено: 30 тыс. п. м металлического профиля; 27 тыс. м² КНАУФ-листа; 13 тыс. м² КНАУФ-Аквапанель; 400 т штукатурки цементной фасадной КНАУФ-Унтерпутц.





Председатель правления Пермской краевой общественной организации «Союз архитекторов» В.А. Воженников (слева), руководитель службы корпоративных коммуникаций группы КНАУФ Россия и Беларусь Л.М. Лось и директор колледжа И.А. Коновалов (справа)



Мозаика из фрагментов плитки, выполненная студентом колледжа



В Пермском крае образовательным партнером компании КНАУФ стал Пермский строительный колледж, который уже более 90 лет готовит профессиональные кадры для строительной отрасли. За это время было подготовлено свыше 35 тыс. высококвалифицированных специалистов, которые составили основу предприятий стройиндустрии, архитектурных мастерских, проектных и строительных организаций г. Перми и Пермского края.

Сотрудничество начиналось с того, что компания поставляла материалы как для учебного процесса, так и для подготовки ребят в рамках чемпионатного движения Worldskills (с 2022 г. переименовано в чемпионатное движение «Профессионал»). В настоящее время КНАУФ удалось сформировать хорошую команду экспертов, которые делятся своим профессиональным мастерством как с представителями бизнеса, так и с обучающимися.

На базе колледжа проводятся мастер-классы, семинары и лекции о современных тенденциях в строительстве. Мастер-классы компании КНАУФ проводят специалисты по сухому строительству и штукатурным работам. Осуществляется знакомство студентов, мастеров производственного обучения и преподавателей с новыми материалами, технологиями в строительстве, а также с внутренней отделкой зданий и сооружений.

Сотрудничество колледжа и компании КНАУФ способствует повышению уровня подготовки квалифицированных рабочих и специалистов среднего звена для строительной отрасли Пермского края и РФ.

Изменения в городской среде – строительство новых магистралей и улиц – позволили восстановить транспортную связанность и объединить разрозненные пространства города. Проектируется новый мост через р. Каму. Запланировано благоустроить более сорока парков и скверов, что однозначно благоприятно скажется на экологической обстановке. Преображаются главная набережная р. Камы и набережная в Кировском районе. В городе планируется появление нескольких спорткомплексов. Эти факторы безусловно благоприятно влияют на увеличение объемов как многоэтажного, так и индивидуального жилья, а следовательно, значительно увеличивается потребность в качественных строительных материалах, системах и решениях.

Именно здесь открывается возможность реализации огромного потенциала и увеличения производственных мощностей компании КНАУФ, которая предлагает каркасные технологии, технологии сухого строительства и материалы, задающие тренд на качество и комфорт.

Т.А. Абакумова

Фото: автора; Д. Ромашкова



ТРЦ «iMALL Эспланада»

Безопасность – важнейшее требование, предъявляемое государством и обществом к зданиям, предназначение которых предполагает одновременное нахождение большого количества людей. Для инвесторов ТК и ТРЦ очень важны и сроки строительства, и гибкость, простота трансформации. Все это легко обеспечивается при правильном применении каркасно-обшивных систем во внутренней отделке.

Расположенный в центре города ТРЦ «iMALL Эспланада» (первая очередь строительства многофункционального пространства) стал одной из достопримечательностей города. Стартом проекта можно считать весну 2019 г., когда было подписано распоряжение о присвоении проекту статуса приоритетного инвестиционного проекта.

Разработкой проекта занималось архитектурное бюро Twelve Architects, которое реализовало уже ряд концепций на территории РФ. Уникальность объекта подчеркнута сложным тканевым фасадом, который был разработан именно для данного ТРЦ.

Проект реализовывали с использованием широкой линейки материалов КНАУФ. Возведение перегородок с материалами и по технологии КНАУФ позволило ускорить сроки сдачи объекта в эксплуатацию и обеспечить требования по пожарной безопасности.



УДК 666.973.6

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35>

В.Н. МОРГУН, канд. техн. наук (vnmorgun@sfedu.ru)

Южный федеральный университет (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42)

Научное обоснование структурной модификации свойств пенобетонов

Отражена актуальность развития теории и практики пенобетонов, опирающаяся на эволюционные изменения в науке и социуме. Дан краткий обзор работ, подтверждающих возможность совершенствования свойств пенобетонов при дисперсном армировании волокнами. Сформулировано положение о том, что под структурной модификацией пенобетона следует понимать технологические и рецептурные приемы, обеспечивающие такое использование поверхностной энергии дисперсного сырья, которое пригодно для управления качеством массопереноса при формировании его структуры. Перечислены причины, позволяющие синтетическим волокнам быть эффективными инициаторами массопереноса в технологии неавтоклавных пенобетонов. Представлено научное обоснование этим процессам в период гомогенизации сырья в турбулентных смесителях и в период преобладания вязких связей между компонентами сырья после укладки смесей в опалубку. Выполнен научный анализ влияния взаимно конкурирующих и взаимно зависимых процессов массопереноса на свойства пенобетонных смесей, который позволяет прогнозировать физико-механические свойства пенобетонов в зависимости от рецептуры. Приведены результаты экспериментальной оценки влияния дисперсного армирования пенобетонных смесей волокнами на скорость фазового перехода из вязкого в твердое состояние и физико-механические свойства пенобетонов.

Ключевые слова: пенобетон, фибропенобетон, фибра, дисперсное армирование, структурная модификация, пластическая прочность.

Для цитирования: Моргун В.Н. Научное обоснование структурной модификации свойств пенобетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35>

V.N. MORGUN, Candidate of Sciences (Engineering) (vnmorgun@sfedu.ru)

Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation)

Scientific Justification for Structural Modification of Foam Concrete Properties

The relevance of the development of the theory and practice of foam concrete, based on evolutionary changes in science and society, is reflected. A brief overview of the work confirming the possibility of improving their properties during dispersed reinforcement with fibers is given. The provision is made that the structural modification of foam concrete should be understood as technological and recipe techniques that ensure such use of the surface energy of dispersed raw materials, which is suitable for controlling the quality of mass transfer during the formation of its structure. The reasons that allow synthetic fibers to be effective initiators of mass transfer in non-autoclave foam concrete technology are listed. Scientific justification of these processes is given during homogenization of raw materials in turbulent mixers and during the period of predominance of viscous bonds between components of raw materials after placing of mixtures in formwork. A scientific analysis of the influence of mutually competing and mutually dependent mass transfer processes on the properties of foam concrete mixtures was performed, which makes it possible to predict the physical and mechanical properties of foam concrete depending on the formulation. The results of experimental evaluation of the effect of dispersed reinforcement of foam concrete mixtures by fibers on the rate of phase transition from viscous to solid and the physical and mechanical properties of foam concrete are given.

Keywords: foam concrete, fiber foam concrete, fiber, dispersed reinforcement, structural modification, plastic strength.

For citation: Morgun V.N. Scientific justification for structural modification of foam concrete properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 29–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35>

Пенобетоны, применяемые в строительстве преимущественно в качестве стеновых, в течение более 120 лет с момента их изобретения зарекомендовали себя как долговечные, безопасные, энергоэффективные и ресурсосберегающие материалы [1]. Первое столетие их применения характеризовалось тем, что газонаполненный бетон плотностью 600 кг/м³ и выше обеспечивал требуемый практической уровень прочности, трещиностойкости и энергосбережения.

Энергетические кризисы конца XX в. в сочетании с ростом средней продолжительности жизни населения планеты [2] поставили проблему защиты окружающей среды от тепловых выбросов, воз-

никающих в результате бытовой и инженерной деятельности человека. Перечисленные особенности эволюции современного мира потребовали применения в строительстве ячеистых бетонов меньшей плотности, трещиностойкости которых, определяемая соотношением прочностей материала при растяжении и при сжатии, перестала удовлетворять требованиям. В результате домостроительные комбинаты, обеспечивавшие в XX в. строительство панельного жилья, вынуждены были изменить номенклатуру выпускаемых изделий и перейти от крупноразмерных панелей к мелкоштучным блокам. Важнейшей причиной обозначенного перехода стала невозможность бездефектного

изготовления и успешного транспортирования к возводимому объекту крупногабаритных изделий из автоклавного газосиликата или неавтоклавного пенобетона из-за их недостаточной трещиностойкости, зависящей от плотности и габаритов конструкций.

Научное обоснование принципиальной возможности резкого повышения трещиностойкости пенобетонов впервые было сформулировано в работах выдающегося ученого Ленинградского инженерно-строительного института Игоря Александровича Лобанова [3] и развито в работах его учеников [4–7]. Практика подтвердила актуальность их исследований и в настоящее время на предприятиях строительной РФ выпускают следующую номенклатуру изделий [7] из дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения:

- стеновые блоки и плиты плотностью от 200 до 800 кг/м³;
- галтели (погонажные изделия, предназначенные для теплоизоляции мест сопряжения оконных и дверных проемов с несущими строительными конструкциями) плотностью от 400 до 600 кг/м³;
- перемышки гражданских зданий брусковые и арочные с несущей способностью до 27,5 кН/м;
- карнизные изделия;
- сборные блоки вентиляционных каналов.

Под структурной модификацией строительных материалов следует понимать такие технологические и рецептурные приемы, при использовании которых поверхностная энергия компонентов сырья, несмотря на разнообразие их дисперсности и вещественного состава, становится технологически значимой и пригодной для управления процессами массопереноса при формировании структуры материалов. Тогда в ходе переработки сырья появляются инструменты, технологические и рецептурные, способные обеспечивать требуемые практикой структуру и эксплуатационные свойства материалов. Опираясь на изложенный тезис, рассмотрим прием структурной модификации цементосодержащих строительных композитов на примере пенобетонов.

Постановка задачи

В качестве рецептурного компонента – инициатора структурной модификации пенобетонов рассмотрим синтетические волокна с соотношением длина:диаметр, равным 1000. Такие волокна в силу своих геометрических размеров обладают следующими важными для применения в технологии пенобетонов особенностями:

- мощным поверхностным энергетическим потенциалом [8];
- гибкостью;
- щелочестойкостью [9].

После перемешивания сырья и укладки в опалубку пенобетонных смесей в газонаполненной вязкопластичной дисперсной системе развивается адсорбционная и химическая диспергация клинкерных ми-

нералов цементного вяжущего [10]. Этот процесс, интенсивность которого высока в период от момента контакта с водой до наступления схватывания вяжущего, обеспечивает в пенобетонных смесях перевод свободной и слабо физически связанной воды затвердения в более прочно физически связанную с частицами вяжущего, дисперсность которого лавинообразно [10] растет.

Поэтому в любом виде пенобетонной смеси после ее укладки в опалубку наблюдается рост пластической прочности [7, 11], величина которой управляет ее способностью сохранять или утрачивать дисперсией газовую пористость, полученную в смешительном агрегате. Сравнивая скорости роста пластической прочности равноплотных классических и дисперсно-армированных волокнами пеносмесей, следует признать, что этот процесс в последних развивается гораздо интенсивнее [11]. Причиной установленного различия являются:

- наличие в жидкой фазе смеси высокодисперсных частиц клинкерных минералов;
 - форма, размеры и величина поверхностного энергетического потенциала синтетической фибры.
- Опираясь на кривую Е.И. Шмицько, отражающую теоретические и практические возможности управления процессами структурообразования в цементно-водных дисперсных системах в зависимости от их водосодержания [10], можно утверждать, что устойчивость таких систем имеет место только в случаях преобладания электростатических сил над гравитационными.

Н.П. Блещиком установлено [12], что при водосодержании смесей, в которых V/C достигает величины, равной 1,65 $K_{нг}$ (коэффициент нормальной густоты) цементного теста, толщина сольватных оболочек на поверхности дисперсных частиц вяжущего достигает 100 нм (10^{-7} м, или 0,1 мкм). Принято считать [3, 4, 10], что достижение такой толщины водных пленок приводит к тому, что в балансе внутренних сил электростатические уступают гравитационным и дисперсные системы превращаются в кинетически неустойчивые суспензии с обязательным проявлением седиментации.

Одной из важнейших причин, влияющих на дальное действие электростатических сил в дисперсных системах, является размер кластерной структуры воды. Толщина высокоорганизованной кластерной структуры чистой воды, по данным [13], на границе раздела «газ–жидкость» составляет 3,1 нм. Если вода имеет в своем составе растворенные соли и обладает плотностью больше 1 г/см³, то толщина кластерноупорядоченного слоя достигает большей величины. В экспериментах В.М. Юрова переходный слой между кластерной и объемной водой [13] достигал 31 нм (0,031 мкм). В объемной воде электростатические силы поверхности твердой фазы становятся незначимыми.

Теоретически управление седиментационной и агрегативной устойчивостью пенобетонных смесей

является фундаментальной основой для совершенствования эксплуатационных свойств затвердевших бетонов. Причиной утверждения является тот факт, что накопление дефектов структуры пенобетонов в виде трещин и неравномерного распределения дисперсных фаз происходит в период преобладания вязких связей между компонентами твердой фазы, т. е. тогда, когда устойчивость полученной в бетоносмесителе структуры обеспечивается только за счет преобладания электростатических сил над гравитационными.

При этом важно понимать, что в уложенной в форму пенобетонной смеси в период до завершения процессов схватывания в вяжущем имеют место следующие *взаимно конкурирующие и взаимно зависимые процессы массопереноса*, способные управлять мерой дефектности затвердевшего бетона:

- продолжается адсорбционная и химическая диспергация клинкерных минералов, которая началась при контакте вяжущего с водой затворения;

- начинается процесс формирования кластеров из наночастиц сырьевой смеси потому, что они обладают избыточной поверхностной энергией. В результате перемещения мельчайших обводненных частиц клинкерных минералов к грубодисперсным частицам сырья (песку и/или фибре) с течением времени формируются кластеры соответствующей формы, плотность упаковки наночастиц на поверхности которых убывает [14–16] от центра к периферии;

- в образовавшихся кластерах развивается процесс гидратации клинкерных минералов, который, с одной стороны, носит конструктивный характер потому, что из гидратных фаз со временем возникнет кристаллическая структура новообразований, отвечающая за прочностные свойства бетона. А с другой – этот процесс предопределяет рост концентрации [17, 18] поверхностно-активных веществ (ПАВ) в остающемся объеме жидкой фазы пенобетонной смеси. В том случае, когда критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) в межчастичной жидкости достигается ранее того момента, когда объемная кристаллическая структура гидратированного цемента способна противостоять гравитационным силам, в рассматриваемой дисперсной системе возникают условия для накопления дефектов в результате скачкообразного [17–19] изменения упругости пенных пленок.

Рассмотрим особенности массопереноса на обозначенном этапе существования пенобетонных смесей более подробно потому, что именно они на наноуровне способны управлять мерой дефектности получаемого бетона.

Если растущая концентрация ПАВ в межчастичной жидкости в результате химического связывания свободной воды достигает ККМ ранее образования в бетонной смеси достаточно прочного кристаллического каркаса из прогидратировавшихся клинкерных минералов, то в результате нарушения

подвижного равновесия между количеством ПАВ в пленках и межчастичной жидкости скачкообразно падает упругость пенных пленок. Это приводит к частичному объединению мелких газовых пор в крупные.

Поскольку в результате объединения мелких воздушных пор в крупные суммарная поверхность раздела фаз «газ–жидкость» уменьшается, то избыток молекул ПАВ, ранее расположенных в составе пенных пленок и обеспечивавших удержание мелких фракций воздуха, дополнительно повышает концентрацию ПАВ в межчастичной жидкости. Сравнивая размеры и форму молекул ПАВ с молекулами воды [13, 17] и опираясь на закономерности, установленные в физической химии [17, 18], можно полагать, что в жидкой фазе пенобетонной смеси на данном этапе существования ее структуры существуют электростатические силы, достаточные для образования мицелл. А крупные газовые поры могут развить выталкивающую силу, достаточную для разрыва капиллярных, обеспечивающих сцепление между частицами твердой фазы в межпоровых перегородках пенобетонной смеси. Наличие крупных пор и мицелл ПАВ в межчастичной жидкости межпоровых перегородок негативно влияет на пластическую прочность пенобетонных смесей и предопределяет возникновение в затвердевшем пенобетоне ряда дефектов, ухудшающих его эксплуатационные свойства.

В том случае, когда пенобетонная смесь содержит фибру, геометрические параметры и количественная мера которой достаточны для управления скоростью и формой образования кластеров в пенобетонных смесях, должны возникать условия для совершенствования процессов массопереноса в пенобетонных смесях. Следствием этого процесса [4, 7, 8] являются улучшенные эксплуатационные свойства затвердевшего бетона.

Результаты и обсуждение

С целью количественной оценки меры этого влияния был выполнен следующий эксперимент. В лабораторном турбулентном смесителе емкостью 60 л изготавливались равноплотные пено- и фибропенобетонные смеси с различным содержанием полипропиленовой фибры длиной 18 и диаметром 0,018 мм. В ходе эксперимента контролировались следующие свойства смесей и затвердевших бетонов:

- средняя плотность смеси и затвердевшего бетона (после твердения в нормальных условиях в течение 28 сут и в сухом состоянии);

- кинетика пластической прочности смесей в течение 3 ч после их укладки в формы;

- механическая прочность при сжатии на образцах-кубах с ребром 100 мм и растяжение при изгибе на балках размером 100×100×300 мм.

Средние показатели результатов экспериментальной оценки свойств по пяти образцам пробам-близнецам приведены в таблице.

**Сводная таблица результатов испытаний
Summary table of test results**

Марка	Средняя плотность, кг/м ³ *			Пластическая прочность, Па*		Прочность, МПа*	
	Смеси	Бетона ^W **	Бетона ^C **	Начальная	Конечная	При сжатии	Растяжение при изгибе
ПБ ₅ ***	748/1,02	578/1,43	499/1,66	41/8,7	96/7,9	2,75/14	0,54/24,5
ПБ ₇	911/0,96	766/1,05	705/1,13	47/8,2	117/8	3,42/13,2	0,73/21,6
ФПБ ₅₁	742/0,99	547/1,28	492/1,29	42/8,2	109/7,6	2,78/11,9	0,60/18,7
ФПБ ₅₂	738/0,95	551/0,99	486/1,03	48/5,5	162/5,1	2,82/12,1	0,98/10,7
ФПБ ₅₃	730/0,95	553/0,98	483/0,95	51/5,4	184/5,1	2,86/9,2	1,44/7,8
ФПБ ₇₁	906/0,89	755/1,05	701/1,06	49/7,6	141/6,9	3,40/13,2	0,85/20,1
ФПБ ₇₂	892/0,9	748/0,9	688/0,84	55/5,1	201/4,8	3,44/7,4	1,46/10
ФПБ ₇₃	892/0,9	742/0,88	676/0,8	58/4,9	238/4,1	3,51/5,8	1,81/7,7

Примечания:

* Результаты испытаний представлены в следующем виде: числитель – среднее арифметическое контролируемого свойства, знаменатель – коэффициент вариации в %.

** Индекс «w» соответствует плотности при влажности бетона после 28 сут нормального твердения, а индекс «с» – бетону, высушенному до постоянной массы.

*** Маркировки ПБ₅ и ПБ₇ относятся к смесям и бетонам, не содержащим дисперсной арматуры, марок по плотности соответственно D500 и D700; первая цифра маркировки ФПБ относится к смесям и бетонам соответствующих марок по плотности, содержащим фибру; вторая цифра индекса соответствует количеству фибры от объема цементного камня: 1 = 0,3%; 2 = 0,8%; 3 = 1,3%.

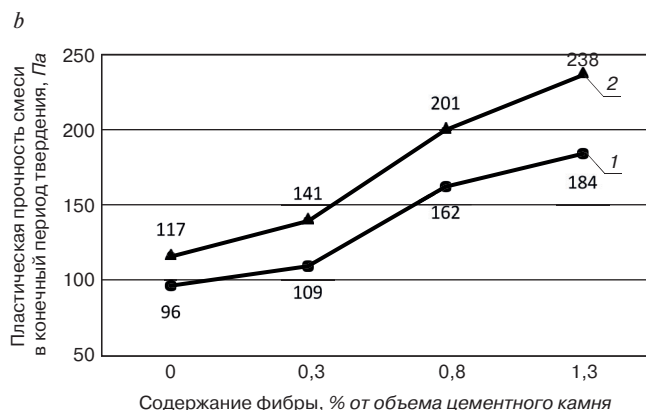
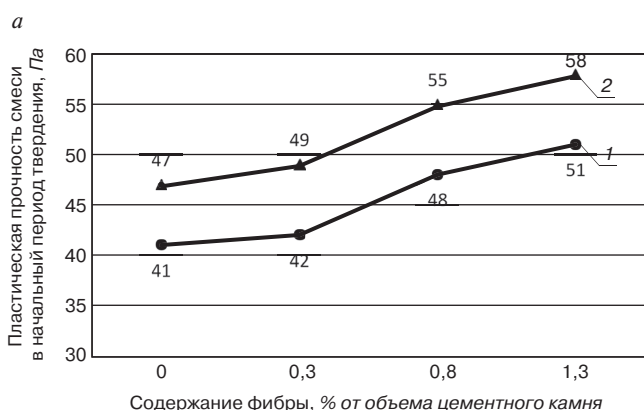


Рис. 1. Показатели пластической прочности пеносмесей: *a* – сразу после укладки в формы; *b* – через 3 ч после укладки в формы: 1 – D500; 2 – D700
Fig. 1. Plastic strength of foam mixtures: *a* – immediately after stacking; *b* – 3 hours after stacking: 1 – D500; 2 – D700

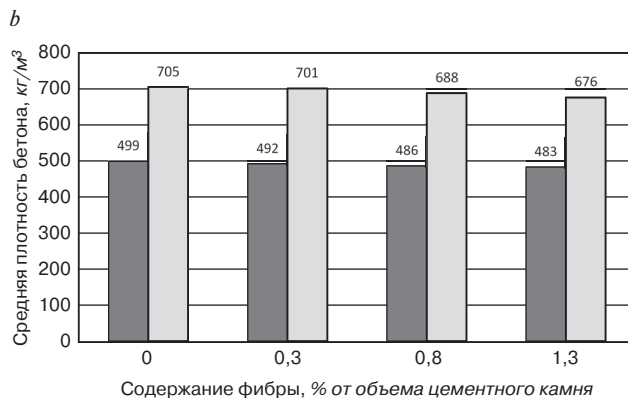
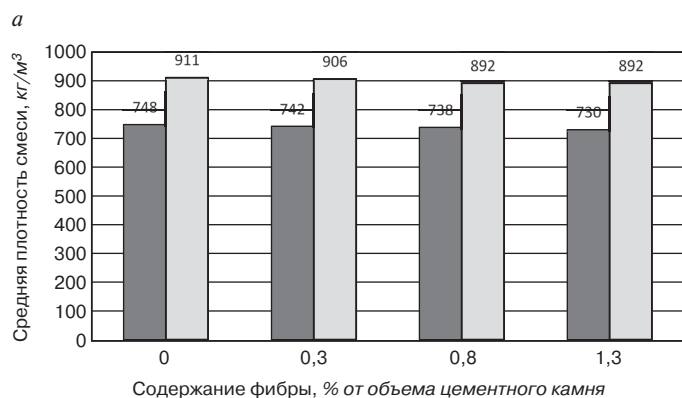


Рис. 2. Влияние уровня дисперсного армирования на плотность: *a* – полученных пенобетонных смесей; *b* – затвердевших и высушенных пенобетонов: ■ – D500; □ – D700
Fig. 2. Effect of the level of dispersed reinforcement on the density of: *a* – the obtained foam concrete mixtures; *b* – hardened and dried foam concrete: ■ – D500; □ – D700

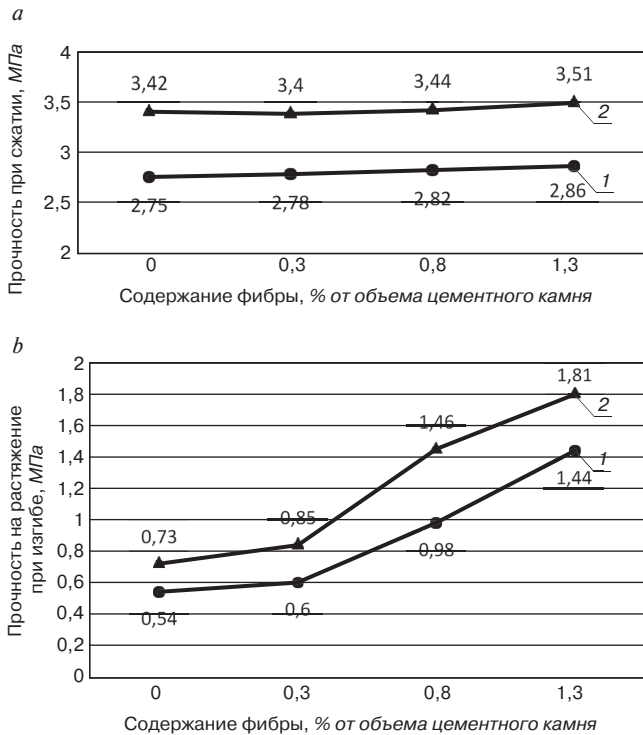


Рис. 3. Влияние меры дисперсного армирования на прочность пенобетонов: *a* – при сжатии; *b* – на растяжение при изгибе: 1 – D500; 2 – D700
Fig. 3. Impact of the dispersion reinforcement measure on: *a* – the strength of foam concrete during compression; *b* – the bending tensile strength of foam concrete: 1 – D500; 2 – D700

Графическая интерпретация данных, приведенных в таблице, представлена на рис. 1–6. Результаты контроля показателей пластической прочности исследуемых пенобетонных смесей показали, что введение полипропиленовой фибры в их рецептуру позволяет прогнозировать ускорение фазового перехода из вязкого в упругое. Основой данного положения является полученная четкая зависимость между величинами пластической прочности в фиксированные моменты времени (рис. 1 и 2). Установлено, что различия в пластической прочности смесей, проектной плотности D500 и D700 сразу после укладки их в формы на каждом уровне дисперсного армирования составляют соответственно 14,6; 16,7; 14,5; 13,7% (рис. 1, *a*). Через 3 ч после укладки смесей в формы эти различия достигают величин 21,9; 29,4; 24,1; 29,3% (рис. 1, *b*).

Обращает на себя внимание тот факт, что абсолютный прирост пластической прочности за 3 ч твердения в смесях без фибры для бетона марки D500 составил 55 Па. При содержании всего 0,3% от объема цементного камня эта разница достигла 67 Па, а при максимальном уровне дисперсного армирования она составила 133 Па. Динамика роста пластической прочности пенобетонной смеси за счет дисперсного армирования ее в количестве 1,3% от объема цементного камня составила 242% (рис. 1, таблица).

Анализ данных, отражающих особенности формирования структуры в пенобетоне марки D700,

показывает, что зафиксированные особенности процесса носят аналогичный характер. В смеси, не содержащей фибры, прирост пластической прочности за 3 ч твердения составил 70 Па, а в максимально дисперсно-армированной этот показатель достиг 180 Па. Динамика роста в данном случае составила 257%.

Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что наличие избыточной поверхностной энергии у полипропиленовой фибры обеспечивает ее способность положительно влиять на скорость формирования кластеров волокнистой формы в рассматриваемой дисперсной системе.

Из данных таблицы и графиков, представленных на рис. 2, следует, что фибра, использованная в экспериментальных исследованиях, обладает положительным влиянием на среднюю плотность пенобетонных смесей. Введение в смесь незначительного количества фибры (0,3% от объема цементного камня) приводит к понижению средней плотности пенобетонной смеси на 0,81 и 0,55% для проектных плотностей D500 и D700 соответственно. Анализ величин плотности затвердевшего бетона показывает, что в сухом виде эта разница составляет 1,42 и 0,57% соответственно. Полученные данные можно считать малозначимыми и отнести их к разбросу показателей в рамках ошибок измерений. Но если пенобетоны содержат значимое для их физико-механических свойств количество дисперсной арматуры, то снижение плотности демонстрирует устойчивую тенденцию и составляет для:

- смесей марки D500 при содержании фибры 0,8 – 1,34%, а для марки D700 – 0,55%. При содержании фибры 1,3% для D500 – 2,47%, для D700 – 2,13%;

- затвердевших и высушенных бетонов D500 при содержании фибры 0,8 – 2,61%, а для марки D700 – 2,47%. При содержании фибры 1,3% для D500 – 3,21%, для марки D700 – 4,11%.

Полученный ряд данных свидетельствует о подтверждении закономерности, установленной В.Т. Перцевым [16] и отражающей способность цементосодержащих дисперсных систем при формировании кластеров отжимать физически слабо связанную воду из центра к периферии. Указанная особенность процесса массопереноса на этапе преобладания вязких связей между сырьевыми компонентами объективно способствует понижению концентрации ПАВ в межчастичной жидкости, а после завершения фазового перехода из вязкого в упругое состояние обеспечивает повышение плотности межпоровых перегородок и, как следствие, улучшение механических свойств затвердевших бетонов.

На рис. 3 представлена графическая интерпретация влияния различных концентраций полипропиленовой фибры на механические свойства пенобетонов.

Полученные результаты прочности при сжатии укладываются в закономерности механики композиционных материалов [7, 19] с учетом реальных соот-

ношений между модулями упругости пенобетона и фибры. Дисперсное армирование полипропиленовыми волокнами не оказывает практического влияния на показатели прочности при сжатии.

Мера повышения прочности на растяжение при изгибе (рис. 3, *b*) четко коррелирует с уровнем дисперсного армирования.

Соотношение между прочностью при растяжении при изгибе и прочностью при сжатии у пенобетонов обеих марок составляет примерно 0,2. Незначительное введение фибры в количестве 0,3% практически не изменяет этого соотношения, бетон остается хрупким. При содержании в бетонах фибры в количестве 0,8% прочность при растяжении при изгибе превысила 35% от прочности при сжатии, что свидетельствует о существенном повышении трещиностойкости пенобетона. Дальнейшее насыщение пенобетонных смесей полипропиленовой фиброй привело к тому, что прочность при растяжении при изгибе превысила 50% от прочности на сжатие.

Выводы

В ходе выполненных исследований научно обоснован выбор эффективного модификатора структуры для пенобетонных смесей. Результаты анализа процессов массопереноса в период гомогенизации сырья и научные данные о размерах кластерных структур воды в дисперсных системах позволили выявить перечень важнейших факторов, управляющих агрегативной и седиментационной устойчивостью пенобетонных смесей. Установлен перечень взаимно конкурирующих и взаимно зависимых процессов, управляющих особенностями массопереноса в период преобладания вязких связей между дисперсными частицами смеси. Научно обоснованы:

– корреляционная связь между параметрами дисперсных частиц смеси и формой кластеров, образую-

щихся в пеносмеси в результате протекания нанопроцессов массопереноса;

– влияние подвижного равновесия между ПАВ в пенных пленках и в межчастичной жидкости на процессы массопереноса и агрегативную устойчивость пенобетонных смесей.

Сформулирован тезис о том, что геометрические параметры и количество фибры должны быть достаточными для обеспечения эффективности энергетического влияния на процессы массопереноса в пенобетонных смесях для того, чтобы затвердевшие бетоны обладали заданными свойствами. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность изложенных научных положений и доказали, что полипропиленовая фибра в количестве, достаточном для влияния на процессы массопереноса, является:

– эффективным инструментом управления качеством и периодом фазового перехода от вязкого к твердому состоянию;

– способствует некоторому снижению средней плотности затвердевшего бетона;

– позволяет получать теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны высокой трещиностойкости.

References

Список литературы

1. Бартењева Е.А., Машкин Н.А. Исследование свойств модифицированного пенобетона // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 36–40.
2. Михеев А.А., Шутикова Е.А. Социальные проблемы урбанизации и сити-менеджмент на этапе постмодерна // *Право и управление. XXI век*. 2015. № 2 (35). С. 73–78.
3. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов): Дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1982. 384 с.
4. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // *Вестник гражданских инженеров*. 2004. № 1. С. 98–103.
5. Магдеев У.Х., Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Трещинообразование дисперсно-армированных

1. Bartenyeva E.A., Mashkin N.A. Research of properties of modified foam concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 10, pp. 36–40. (In Russian)
2. Mikheev A.A., Shutikova E.A. Social problems of urbanization and city-mejment at the postmodern stage. *Pravo i upravlenie. XXI vek*. 2015. No. 2 (35), pp. 73–78. (In Russian).
3. Lobanov I.A. Fundamentals of the technology of dispersed reinforced concretes: fibrobetons. Doct. Diss. (Engineering). Leningrad. 1982. 384 p. (In Russian).
4. Pukharenko Yu.V. Principles of structure formation and prediction of fiber concrete strength. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2004. No. 1, pp. 98–103. (In Russian).
5. Magdeev W.H., Morozov V.I., Pukharenko Yu.V. Cracking of dispersed reinforced concrete from the standpoint of fracture mechanics. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012. No. 1 (9), pp. 110–117. (In Russian).
6. Talantova K.V. Stalefibrobeton i konstruksii na ego osnove [Steel fiber concrete and constructions based thereon]. Sankt-Peterburg: FGBOU VPO PGUPS. 2014. 276 p.
7. Morgun L.V. Penobeton: monografiya [Foam concrete: monograph]. Rostov-on-Don: RGSU. 2012. 154 p.
8. Roy S., Ghosh S., Bhowmick N. and Roychoudhury P.K. Study the effect of denier and fiber cutlength

- бетонов с позиций механики разрушения // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 1 (9). С. 110–117.
6. Талантова К.В. Сталефибробетон и конструкции на его основе. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. 276 с.
 7. Моргун Л.В. Пенобетон: Монография. Ростов н/Д: РГСУ, 2012. 154 с.
 8. Roy S., Ghosh S., Bhowmick N. and Roychoudhury P.K. Study the effect of denier and fiber cutlength on zeta potential of nylon and polyester fibers for sustainable dyeing process // *Journal of Environmental Research And Development*. 2016. Vol. 11. Iss. 2, pp. 392–397.
 9. Qin Xiaochun, Li Xiaoming, Cai Xiaopei. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. Vol. 10. Iss. 6, pp. 536–544. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.06.003
 10. Шмитко Е.И. Управление процессами твердения структурообразования бетонов: Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 1994. 525 с.
 11. Вотрин Д.А., Моргун Л.В. Управление скоростью фазового перехода в фибропенобетонных смесях с помощью длины армирующей фибры // *Наука и бизнес: пути развития*. 2018. № 5 (83). С. 47–52.
 12. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуумбетона. Минск: Наука и техника, 1977. 231 с.
 13. Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь, 2018. Вып. 10. С. 691–699. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.691
 14. Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. Донецк: Цифровая типография, 2011. 255 с.
 15. Mandelbrot B. *Les objects fractal*. France: Flammanon. 1995. 200 p.
 16. Помазков В.В. и др. Управление процессами технологии, структурой и свойствами бетонов: Методология. Процессы самоорганизации структуры. Механика прочности и разрушения. Управление процессами структурообразования и свойствами. Прикладные вопросы технологии / Под ред. Е.М. Чернышова, Е.И. Шмитко. Воронеж: ВГАСУ, 2002. 343 с.
 17. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с.
 18. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967. 388 с.
 19. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
 - on zeta potential of nylon and polyester fibers for sustainable dyeing process. *Journal of Environmental Research and Development*. 2016. Vol. 11. Iss. 2, pp. 392–397.
 9. Qin Xiaochun, Li Xiaoming, Cai Xiaopei. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. Vol. 10. Iss. 6, pp. 536–544. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.06.003
 10. Shmitko E.I. Control of concrete structure formation hardening processes. *Doct. Diss. (Engineering)*. Voronezh. 1994. 525 p. (In Russian).
 11. Votrin D.A., Morgun L.V. Controlling the rate of phase transition in fibropene concrete mixtures using the length of reinforcing fiber. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018. No. 5 (83), pp. 47–52. (In Russian).
 12. Bleshchik N.P. *Strukturno-mekhanicheskie svoistva i reologiya betonnoi smesi i pressvakuumbetona [Structural-mechanical properties and rheology of concrete mixture and pressvacuum concrete]*. Minsk: Nauka i tekhnika. 1977. 231 p.
 13. Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.C. Surface layer thickness, surface energy and atomic volume of the element. *Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials: Intercollegiate collection of scientific papers*. Tver. 2018. Iss. 10, pp. 691–699. (In Russian). DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.691
 14. Terekhov S.V. *Fraktaly i fizika podobiya [Fractals and physics of similarity]*. Donetsk: Tsifrovaya tipografiya. 2011, 255 p.
 15. Mandelbrot B. *Les objects fractal*. France: Flammanon. 1995. 200 p.
 16. Pomazkov V.V. and etc. *Upravlenie protsessami tekhnologii, strukturoi i svoistvami betonov: Metodologiya. Protsessy samoorganizatsii struktury. Mekhanika prochnosti i razrusheniya. Upravlenie protsessami strukturoobrazovaniya i svoistvami. Prikladnye voprosy tekhnologii. [Management of technology processes, structure and properties of concretes: Methodology. Processes of structure self-organization. Mechanics of strength and fracture. Manage structuring processes and properties. Applied issues of technology]* Ed. by Chernyshov E.M., Shmit'ko E.I. Voronezh: VGASU. 2002. 343 p.
 17. Blinov L.M. *Zhidkie kristally: struktura i svoistva [Liquid crystals: structure and properties]*. Moscow: Knizhnyi dom «Librokom». 2013. 480 p.
 18. Rusanov A.I. *Fazovye ravnovesiya i poverkhnostnye yavleniya [Phase equilibria and surface phenomena]*. Leningrad: Khimiya. 1967. 388 p.
 19. Mett'yuz F., Rolings R. *Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya [Composite materials. Mechanics and technology]*. Moscow: Tekhnosfera. 2004. 408 p.

Л.В. ИЛЬИНА, д-р техн. наук (nsklika@mail.ru),
В.В. МОЛОДИН, д-р техн. наук (molodin@sibstrin.ru),
Н.О. ГИЧКО, старший преподаватель (gichko@sibstrin.ru),
А.К. ТУЛЯГАНОВ, старший преподаватель (klinker@bk.ru)

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
(630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113)

Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия

Поскольку получение высокопрочных и сверхвысокопрочных искусственных конгломератов является первостепенной задачей в области развития строительных наук, а основным компонентом, отвечающим за прочность искусственных композитов на цементной основе, выступает цементная матрица, то повышение ее прочности является актуальной задачей. Изучена возможность упрочнения цементной матрицы путем использования тонкодисперсных минеральных добавок (волластонита, диабаз, диопсида и известняка), являющихся отходами горнодобывающих и горноперерабатывающих производств. Исследования проводились на образцах цементного камня с размерами 20×20×20 мм, изготовленных из цементного теста нормальной плотности. Исследуемые тонкодисперсные добавки вводились в количестве 2–11% от массы цемента. По результатам исследования влияния добавок на прочность цементной матрицы установлено, что при их введении прочность при сжатии цементной матрицы увеличивается. Обоснован выбор минеральных добавок в зависимости от их термодинамических характеристик, в том числе от их твердости. Получены концентрационные экстремальные зависимости прочности цементной матрицы от вида, количества и дисперсности добавок.

Ключевые слова: минеральные добавки, дисперсность, прочность, термодинамические характеристики, цементная матрица.

Для цитирования: Ильина Л.В., Молодин В.В., Гичко Н.О., Туляганов А.К. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 36–42.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42>

L.V. IL'INA, Doctor of Sciences (Engineering) (nsklika@mail.ru),
V.V. MOLODIN, Doctor of Sciences (Engineering) (molodin@sibstrin.ru),
N.O. GICHKO, Senior Lecturer (gichko@sibstrin.ru),
A.K. TULYAGANOV, Senior Lecturer (klinker@bk.ru)
Novosibirsk State Architectural and Construction University (Sibstrin) (113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation)

Improving the Strength Characteristics of Cement Conglomerates with Directional Additives

Since the production of high-strength and ultra-high-strength artificial conglomerates is a paramount task in the development of building sciences, and the cement matrix is the main component responsible for the strength of cement-based artificial composites, increasing its strength is an urgent task. The authors consider the possibility of strengthening the cement matrix by using finely dispersed mineral additives (wollastonite, diabase, diopside and limestone), which are waste products from mining and processing industries. The studies were carried out on samples of cement stone with dimensions of 20×20×20 mm, made from cement paste of normal density. The studied finely dispersed additives were introduced in an amount of 2–11% by weight of cement. According to the results of the study of the effect of additives on the strength of the cement matrix, it was found that with the introduction of these additives, the compressive strength of the cement matrix increases. The paper substantiates the choice of mineral additives, both depending on their thermodynamic characteristics and chemical composition, and depending on their hardness. The concentration extreme dependences of the strength of the cement matrix on the type, quantity and dispersion of additives are obtained.

Keywords: mineral additives, dispersion, strength, thermodynamic characteristics, cement matrix.

For citation: Il'ina L.V., Molodin V.V., Gichko N.O., Tulyaganov A.K. Improving the strength characteristics of cement conglomerates with directional additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 36–42. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42>

Получение высокопрочных и сверхвысокопрочных цементных конгломератов является первостепенной задачей в области развития строительных наук. При использовании в цементных композитах заполнителей из прочных горных пород, т. е. превосходящих прочность искусственного камня в два-три раза, основным компонентом, отвечающим за прочность, является цементная матрица. При этом существенных различий в составе и структуре гидратных новообра-

зований в цементном камне, растворе или бетоне не отмечено [1–4]. Применение тонкодисперсных минеральных добавок (отходов горнодобывающих и горноперерабатывающих производств) может привести к значительному упрочнению искусственных цементных конгломератов (все виды растворов и бетонов) путем упрочнения цементной матрицы. Кроме того, введение данных добавок обеспечивает сокращение расхода портландцемента [5–10].

Необходимость разработки рациональных путей использования отходов горнодобывающих и горноперерабатывающих производств в строительной сфере в России определена концептуальными документами. Положения Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2030 г., (утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.12.2011 № 2227-р (ред. от 18.10.2018), Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу до 2030 г. (утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 г. № 868-р) предопределяют развитие строительного материаловедения с применением отходов промышленности. Таким образом, целесообразность применения тонкодисперсного техногенного или природного сырья при изготовлении цементных композитов обусловлена как требованием повышения их качества, так и необходимостью утилизации многотоннажных отходов производства [11].

Потенциальным источником дисперсных минеральных добавок для получения искусственных конгломератов на цементной основе служат микродисперсные попутные отходы от дробления горных пород из систем пылеулавливания, которые могут использоваться в качестве минеральной добавки без дополнительного помола. К таким материалам относятся микродисперсные порошки известняка, волластонита, диопсида и доломита [4, 12–14]. В России ежегодно образуется около 3,5 млрд т отходов горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий. Строительная индустрия способна утилизировать порядка 25% годового объема вскрышных и попутно добываемых пород, отходов обогащения и отсевов дробления, но использует в настоящее время всего около 4% этого сырья [15–18].

Тонкодисперсные минеральные добавки участвуют в процессе гидратообразования и структурообразования цементных конгломератов. Взаимодействие частиц минеральных добавок с формирующейся цементной матрицей происходит преимущественно по поверхности соприкосновения. Большое значение при этом имеет тип химической связи в соединениях добавки с минералами цементного клинкера [7, 8, 12, 19, 20]. Для научного обоснования выбора минераль-

ных добавок важными являются ее энергетические характеристики – энтальпия образования соединений и их энтропия. По мнению ряда ученых [7, 8, 19, 20], из числа добавок, которые могут быть использованы для улучшения свойств цементной матрицы, а следовательно, и искусственных цементных конгломератов, наиболее близкими к клинкерным минералам являются кальцийсодержащие добавки. В таких строительных композитах следует ожидать хорошую энергетическую совместимость минеральных добавок и цементной матрицы.

Для повышения результативности использования минеральных добавок необходимо контролировать их дисперсность [7, 21]. Наибольшего упрочнения цементной матрицы можно достичь при минимальной межзерновой пустотности между частицами добавки и вяжущего.

Цель настоящей работы – изучение степени влияния минеральных добавок на повышение прочности цементной матрицы и установления факторов, влияющих на данный процесс.

Материалы и методы

В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б АО «Искитимцемент» (г. Искитим, Новосибирская область), изготовленный из клинкера следующего минералогического состава, мас. %: C_3S – 68,19; C_2S – 10,56; C_3A – 5,96; C_4AF – 11,96. Площадь удельной поверхности 337 кг/м². Химический состав клинкера, мас. %: SiO_2 – 22,58; Al_2O_3 – 5,41; Fe_2O_3 – 3,73; CaO – 60,99; MgO – 2,94; SO_3 – 2,32; ППП – 0,83. Портландцемент хранился в нормальных условиях (температура $20 \pm 2^\circ C$, влажность не более 60%) в течение 7 сут.

В качестве добавок исследованы дисперсные порошки природных каменных материалов, являющихся отходами горнодобывающих или горноперерабатывающих производств: диопсид, волластонит, известняк, диабаз. Химический состав минеральных добавок приведен в табл. 1

В работе также использовался дисперсный диабаз производства ООО «Диабазит». Вещественный состав используемого диабаза, мас. %: плагиоклаз альбитизированный – 57,3; авгит – 20,1; актинолит – 5,6; хлорит (гидрохлорит) – 6,2; эпидот – 5,3; серицит – 2,7; сфен – 1; магнетит – 1; гидроксид железа – менее 0,8.

Таблица 1
Table 1

Химический состав минеральных добавок (по данным производителя)
The chemical composition of mineral additives (according to the manufacturer)

Наименование горной породы	Химический состав, мас. %							
	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	R_2O	TiO_2	ППП
Диопсид	53,44	26,23	17,9	0,2	0,09	0,11	0,1	1,91
Волластонит	53,43	34,72	0,3	3,06	2,34	–	–	6,24
Известняк	0,5	54,7	0,5	0,2	0,1	–	–	40,4

Дисперсность минеральных добавок (табл. 2) определялась с помощью лазерного анализатора дисперсности типа PRO-7000 фирмы Seishin Enterprice Co., LTD (Япония).

Волластонит, измельченный в шаровой мельнице, имел волокнистую структуру, что подтверждалось характеристическим соотношением длина : толщина, равным 4:1–5:1.

Рентгенограммы получены на порошковом дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS, Германия). Количественный анализ проведен методом Ритвельда (безэталоный метод), расчет выполнен в программе для профильного и структурного анализа Topas 4.2 (Bruker AXS, Германия).

Научная гипотеза. Обоснование выбора добавок

Для обоснования выбора добавок необходимо сравнить термодинамические характеристики добавок и минералов клинкера (табл. 3), твердость добавок (табл. 4).

Анализ сравнения термодинамических характеристик показал близость энтальпии и энтропии образований добавок и клинкерных минералов.

Твердость клинкера достаточно высока и составляет 6–7 по шкале Мооса. Однако твердость гидратных новообразований значительно ниже и, как правило, не превышает 3,5–4.

Выбор принятых в исследовании добавок (волластонит, диопсид, известняк), во-первых, обусловлен близостью их термодинамических характеристик и химического состава с минералами клинкера и, следовательно, возможностью данных добавок выступать подложками для кристаллизации гидратных новообразований.

Во-вторых, при выборе добавок необходимо учитывать их твердость. Если твердость, а следовательно, и модуль упругости минеральной добавки выше, чем гидратированного цемента, то это будет приводить к перераспределению напряжений в цементном камне при действии на него внешних механических нагрузок. Кроме того, добавки, обладающие высокой твердостью, препятствуют развитию микротрещин в цементном камне.

В-третьих, добавки, обладающие волокнистой структурой, будут осуществлять микроармирование цементной матрицы искусственных композитов.

Результаты

Исследуемые добавки вводили в портландцемент в количестве 2–11 мас. %. Из полученной сухой смеси готовили цементное тесто стандартной густоты и затем формовали образцы размером 20×20×20 мм. Образцы твердели в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) и в стандартных условиях. ТВО проводилась по режиму: 3 ч – подъем температуры до 90°C, 8 ч – изотермическая выдержка при данной температуре. В стандартных условиях (температура 20±2°C, влажность – 100 %) образцы набирали прочность в течение 1, 3, 7 и 28 сут.

**Таблица 2
Table 2**

**Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам гранулометрического анализа
Indicators of dispersion of mineral additives according to the results of granulometric analysis**

Добавка	Площадь удельной поверхности, м ² /кг	Среднеобъемный размер зерен, мкм
Волластонит	309	28,9
Диопсид	393	27
Известняк	470	12,3
Диабаз	540	8,7

**Таблица 3
Table 3**

**Удельные термодинамические характеристики соединений
Specific thermodynamic characteristics of compounds**

Соединение	Энтальпия образования (ΔH ⁰ ₂₉₈), кДж/г	Энтропия образования (S ⁰ ₂₉₈), Дж/(г·К)
3CaO·SiO ₂	-12,83	0,74
β-2CaO·SiO ₂	-13,4	0,74
3CaO·Al ₂ O ₃	-13,29	0,76
CaO·MgO·2SiO ₂ (диопсид)	-14,8	0,66
CaO·SiO ₂ (волластонит)	-14,1	0,71
CaCO ₃ (известняк)	-12,06	0,88

**Таблица 4
Table 4**

**Твердость соединений
Connection hardness**

Соединение	Твердость по шкале Мооса
Диабаз	7
CaO·MgO·2SiO ₂ (диопсид)	6,5
CaO·SiO ₂ (волластонит)	5
CaCO ₃ (известняк)	3

В данной работе исследовалось влияние дисперсности на количество минеральных добавок, приводящих к наибольшему упрочнению цементной матрицы. Для этого принято две добавки (волластонит и диопсид), имеющие дисперсность, сопоставимую с дисперсностью портландцемента, и две добавки (известняк и диабаз), имеющие дисперсность значительно меньшую, чем цемент.

Результаты испытаний представлены на рис. 1.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что введение даже незначительного количества (2%) рассма-

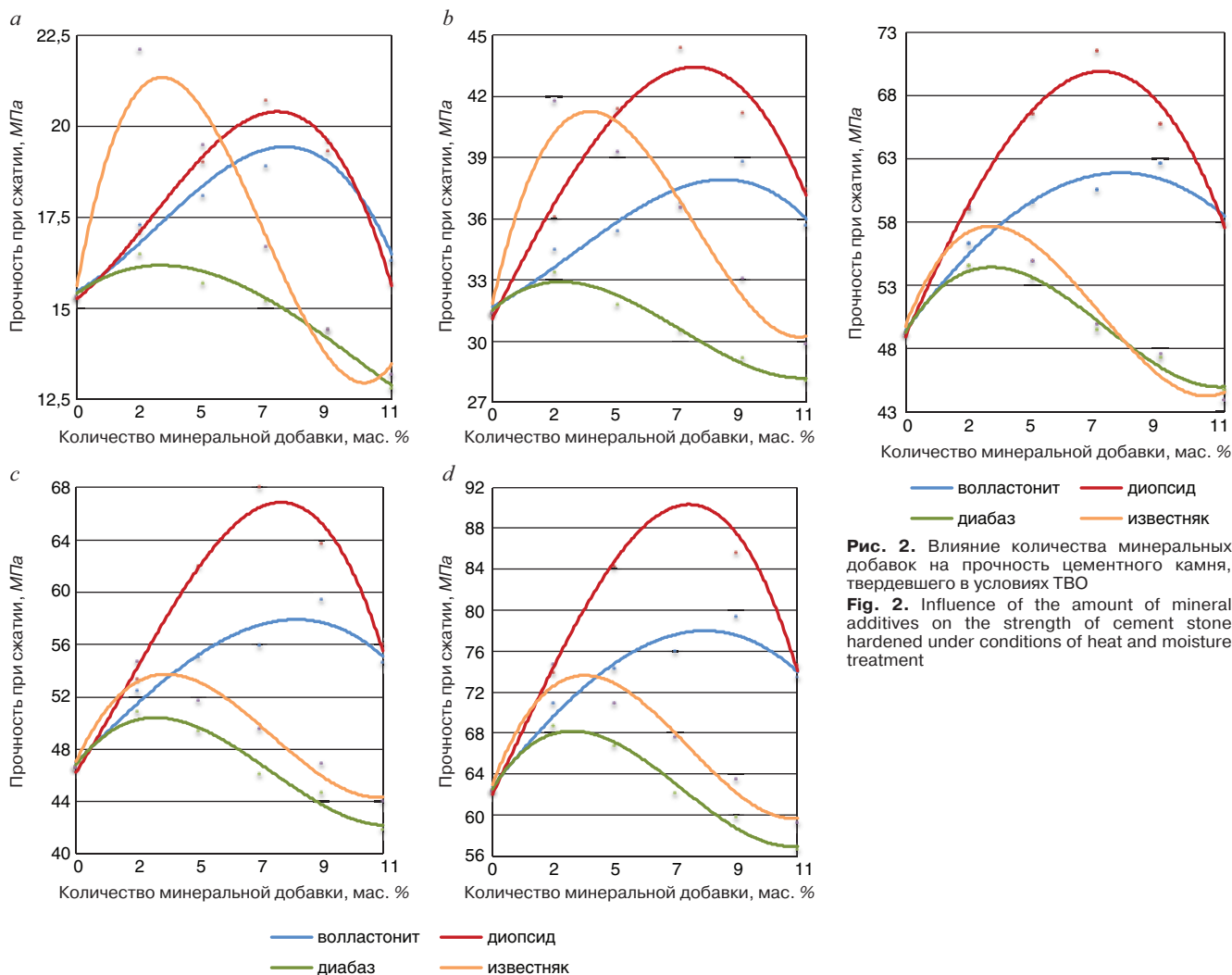


Рис. 1. Влияние количества минеральных добавок на прочность цементного камня, твердевшего в стандартных условиях в течение, сут: *a* – 1; *b* – 3; *c* – 7; *d* – 28
Fig. 1. Influence of the amount of mineral additives on the strength of cement stone hardened under standard conditions during, days: *a* – 1; *b* – 3; *c* – 7; *d* – 28

Рис. 2. Влияние количества минеральных добавок на прочность цементного камня, твердевшего в условиях ТВО
Fig. 2. Influence of the amount of mineral additives on the strength of cement stone hardened under conditions of heat and moisture treatment

триваемых минеральных добавок (волластонита, диопсида, диабаза, известняка) приводит к существенному упрочнению гидратированного цемента.

Полученные концентрационные зависимости показывают, что в начальный период твердения наибольшего упрочнения можно достичь введением известняка. Введение 2% дисперсного известняка приводит к упрочнению камня до 20,2%. В поздние сроки твердения наибольшее влияние оказывает введение волластонита и диопсида. При этом оптимальное количество волластонита составляло 9%, диопсида – 7%. Добавление к цементу 9% волластонита приводит к увеличению прочности до 27,4%; 7% диопсида – к более существенному упрочнению (до 48,1%). При дальнейшем увеличении количества добавок наблюдается снижение прочности камня. Добавление к портландцементу дисперсного диабаза не привело к существенному упрочнению камня как в начальные сроки твердения, так и в более поздние (не более 10%).

Кальцит, составляющий основу известняковой муки, имеет относительно малую твердость – 3 по шкале Мооса. Она меньше, чем у гидратированного цемента. По-видимому, влияние CaCO_3 будет проявляться в наибольшей мере на контактной зоне системы. Оптимальное содержание добавки определяется ее воздействием на процесс гидратации цемента, формированием контактной зоны между частицами добавки и цементным камнем. Для подтверждения данного предположения был проведен рентгенофазовый анализ цементного камня с добавлением известняка и без него.

Анализ дифрактограмм цементного камня с добавкой и без добавки известняка показал, что при введении известняка снижается интенсивность рефлексов портландита ($d=4,93; 2,62; 1,92; 1,79; 1,69; 1,48$), повышается интенсивность рефлексов гидросиликатов кальция ($d=3,1; 3,02; 2,88; 2,77; 2,6$) и появляются рефлексы гидрокарбоалюмината кальция ($d=3,02; 2,88; 2,77; 2,27$).

Таблица 5
Table 5

Отношения радиусов частиц для различных координационных чисел
Ratios of particle radii for various coordination numbers

Координационное число	Отношения радиусов частиц
12	1–0,987
8	0,987–0,732
6	0,732–0,414
4	0,414–0,225
3	0,225–0,155
2	0,155–0

Рассмотрим влияние дисперсности минеральных добавок на их оптимальное количество, приводящее к наибольшему упрочнению цементных композитов. Взаимодействие частиц добавок и портландцемента происходит в зоне их контакта. Вероятно, эффективная концентрация добавок будет достигаться, если частица добавки окружена частицами портландцемента. Меньшее количество добавок снижает эффект от их применения. При большем их введении есть вероятность прямого контакта между частицами добавок, что также уменьшит эффективность их воздействия.

Опираясь на теорию плотнейшей упаковки частиц Л. Полинга, при анализе влияния концентрации добавок на свойства цементных материалов предположим, что частицы как портландцемента, так и добавок имеют сферическую форму и одинаковые размеры, а частицы добавки распределены по объему равномерно. Если плотность добавки отличается от плотности цемента, то оптимальная массовая доля добавки может быть определена по соотношению плотностей:

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho_D}{\rho_C} = 8,3 \frac{\rho_D}{\rho_C}, \quad (1)$$

где n – массовая доля добавки в процентах от массы цемента; ρ_D – истинная плотность добавки, кг/м³; ρ_C – истинная плотность молотого клинкера, кг/м³; k – координационное число (количество частиц цемента, окружающих частицу добавки).

Таким образом, оптимальное содержание добавки при условии, что ее дисперсность близка к дисперсности молотого клинкера, составляет при введении диопсида 8–8,5%. Это значение близко к полученным экспериментальным данным. Приведенные расчеты являются приближенными ввиду того, что реальная форма частиц добавки и молотого клинкера не является сферической, кроме того, частицы добавки и портландцемента имеют некоторый разброс по размеру частиц. Распределение частиц доба-

вок между частицами цемента также является неравномерным. Наряду с этим количественная и качественная характеристики принимаемой концентрации добавок действительно близки к получившемуся показателю. Если диаметр частиц добавки меньше, чем частиц вяжущего вещества, то плотнейшая упаковка достигается при наименьшем координационном числе, т. е. наименьшем количестве частиц цемента, находящихся вокруг частиц добавки.

Если диаметры частиц добавки (D_D) и цемента (D_C) значительно различаются, для расчета оптимальной доли добавки (n_D) может быть использована формула:

$$n = \frac{\frac{\pi D_D^3}{6} \cdot \rho_D}{k \cdot \frac{\pi D_C^3}{6} \cdot \rho_C} = \frac{1}{k} \cdot \frac{D_D^3}{D_C^3} \cdot \frac{\rho_D}{\rho_C}, \quad (2)$$

где k – координационное число, принимаемое по табл. 5.

В соответствии с формулами (1) и (2), с учетом плотности и размеров частиц цемента и введенных добавок полученные расчетные значения и экспериментальные данные оптимальной концентрации добавок близки между собой и составляют для диопсида 7–8%, для известняка и диабаз 2–3%.

Выводы

Таким образом, полученные данные подтверждают научную гипотезу.

1. Повышение прочности камня на 20–48% при введении исследуемых добавок (известняк, волластонит, диопсид) обусловлено близостью их термодинамических характеристик и химического состава с клинкерными минералами. Диабаз, существенно отличающийся химическим составом, при этом приводит к незначительному упрочнению (до 10%).

2. Большой упрочняющий эффект при добавлении диопсида (до 48%) объясняется большей твердостью и большим модулем упругости диопсида по сравнению с волластонитом и известняком, прочность при введении которых увеличивается на 20–27%. Вместе с тем добавление диабаза, обладающего наибольшей твердостью (7 по шкале Мооса) из всех рассматриваемых добавок, привело к несущественному упрочнению, вероятно из-за разницы его химического состава по сравнению с минералами клинкера и новообразованиями, полученными при его гидратации.

3. Волластонит, имеющий волокнистую структуру, приводит к большему упрочнению камня по сравнению с известняком и диабазом за счет микроармирования камня.

4. При увеличении дисперсности оптимальная концентрация добавки, обеспечивающая максимальное возрастание прочности камня, уменьшается.

Список литературы

1. Ахвердиева Т.А., Джафаров Р. Влияние тонко-молотых минеральных добавок на свойства бетона // *Строительные материалы*. 2019. № 3. С. 73–76. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76>
2. Вернигорова В.Н., Саденко С.М. О нестационарности физико-химических процессов, протекающих в бетонной смеси // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 86–89.
3. Нгуен Д.В.К., Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 1 (124). С. 102–117. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>
4. Хафизова Э.Н., Панченко Ю.Ф., Панченко Д.А. Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2021. Т. 18. № 6 (82). С. 790–799. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>
5. Рахимов Р.З. Строительный комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 2 (758). С. 5–15. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15
6. Berra M., Mangialardi T., Carassiti F., Paolini A.E. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 666–675. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132
7. Ilina L.V., Mukhina I.N., Semenova M.M. Hardening cement conglomerates by mining industries waste // *Solid State Phenomena*. 2021. No. 316, pp. 1061–1066. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1061
8. Ilina L., Mukhina I. and Teplov A. Modeling of Cement Activity Increase by Dispersed Mineral // *AIP Publishing. Advanced Materials in Technology and Construction/ Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists «Advanced Materials in Technology and Construction»*, 2016. Vol. 1698. С. 070001. DOI: 10.1063/1.4937871
9. Stefanidou M., Papayianni I. Influence of nano-SiO₂ on the cement pastes // *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43, No. 6, pp. 2706–2710. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.12.015
10. Nadeem A., Shazim Ali Memon, Tommy Yiu Lo. Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38, pp. 338–347. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.042

References

1. Akhverdieveva T.A., Dzhafarov R. Influence of finely ground mineral additives on the properties of concrete. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 3, pp. 73–76. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76>
2. Vernigorova V.N., Sadenko S.M. On the non-stationarity of physical and chemical processes occurring in a concrete mix. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 1–2, pp. 86–89. (In Russian).
3. Nguen D.V.K., Bazhenov Yu.M., Aleksandrova O.V. Influence of quartz powder and mineral additives on the properties of high-strength concretes. *Vestnik of the MSTU*. 2019. Vol. 14. No. 1 (124), pp. 102–117. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>
4. Khafizova E.N., Panchenko Yu.F., Panchenko D.A. The use of technological waste from crushing rocks in the development of cement concrete compositions. *Vestnik of the Siberian State Automobile and Road University*. 2021. Vol. 18. No. 6 (82), pp. 790–799. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>
5. Rakhimov R.Z. Building complex, ecology and mineral binders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022. No. 2 (758), pp. 5–15. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15
6. Berra M., Mangialardi T., Carassiti F., Paolini A.E. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 666–675. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132
7. Ilina L.V., Mukhina I.N., Semenova M.M. Hardening cement conglomerates by mining industries waste. *Solid State Phenomena*. 2021. No. 316, pp. 1061–1066. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1061
8. Ilina L., Mukhina I. and Teplov A. Modeling of Cement Activity Increase by Dispersed Mineral. *AIP Publishing. Advanced Materials in Technology and Construction/ Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists «Advanced Materials in Technology and Construction»*, 2016. Vol. 1698. С. 070001. DOI: 10.1063/1.4937871
9. Stefanidou M., Papayianni I. Influence of nano-SiO₂ on the cement pastes. *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43, No. 6, pp. 2706–2710. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.12.015
10. Nadeem A., Shazim Ali Memon, Tommy Yiu Lo. Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38, pp. 338–347. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.042
11. State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018”. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; NIA-Priroda. 2019. 847 p. (In Russian).

11. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России; НИИ-Природа. 2019. 847 с.
12. Ilina L., Mukhina I. Dry Building Mixrure with Complex Dispersed Mineral Additives // *AOP IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953, P. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012036
13. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Панарин И.И., Воронов В.В. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 39–49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49
14. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Баженов Д.А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331
15. Хозин В.Г., Цыганова Е.А. Роль строительной индустрии в реализации федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 147–159. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_147
16. Володченко А.А., Загороднюк Л.Х., Просолова Е.О., Ахмед А.А., Кулик Н.В. Проблема рационального природопользования // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2014. № 6. С. 7–10.
17. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334. № 1. С. 136–144. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/4045
18. Trofimov B.Y., Mahmudov A.M. The structure and properties of hardened cement paste with modifiers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020 – Number 2»*. 2020. Vol. 962, pp. 022011. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022011
19. Shahova L.D., Chernositova E.S., Schelokova L.S., Uhaneva N.G. Influence of technological additives on the characteristics of cement powders // *Digital Technologies in Construction Engineering. Selected Papers. Ser. «Lecture Notes in Civil Engineering»*. 2022, pp. 259–265. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_33
20. Козлова В.К., Вольф А.В., Маноха А.М., Кишицкий А.А. Роль карбонатных добавок в процессах гидратации и твердения композиционных портландцементов // *Ползуновский альманах*. 2021. № 1. С. 74–76.
21. Ilina L., Kudyakov A., Rakov M. Aerated dry mix concrete for remote northern territories // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. № 5 (113). Article No. 11310. DOI: 10.34910/MCE.113.10
12. Ilina L., Mukhina I. Dry Building Mixrure with Complex Dispersed Mineral Additives. *AOP IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953, P. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012036
13. Lesovik V.S., Fedyuk R.S., Liseitsev Yu.L., Panarin I.I., Voronov V.V. Influence of composition on the properties and structure of modified cement composites // *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 39–49. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49
14. Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Bazhenov D.A. Structure and properties of fine-grained concretes based on composite binders. *Vestnik of the MSTU*. 2019. Vol. 14. Iss. 3, pp. 322–331. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331
15. Khozin V.G., Tsyganova E.A. The role of the construction industry in the implementation of the federal project “Circular Economy”. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2023. No. 1 (20), pp. 147–159. (In Russian). DOI: 10.51608/26867818_2023_1_147
16. Volodchenko A.A., Zagorodnyuk L.Kh., Prosolova E.O., Akhmed A.A., Kulik N.V. The problem of rational nature management. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 6, pp. 7–10. (In Russian).
17. Kopanitsa N.O., Dem'yanenko O.V., Kulikova A.A. Complex additives based on secondary resources for the modification of cement compositions. *Izvestiya of the Tomsk Polytechnic University theta. Engineering of georesources*. 2023. Vol. 334. No. 1, pp. 136–144. (In Russian). DOI: 10.18799/24131830/2023/1/4045
18. Trofimov B.Y., Mahmudov A.M. The structure and properties of hardened cement paste with modifiers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020 – Number 2»*. 2020. Vol. 962, pp. 022011. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022011
19. Shahova L.D., Chernositova E.S., Schelokova L.S., Uhaneva N.G. Influence of technological additives on the characteristics of cement powders. *Digital Technologies in Construction Engineering. Selected Papers. Ser. «Lecture Notes in Civil Engineering»*. 2022, pp. 259–265. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_33
20. Kozlova V.K., Vol'f A.V., Manokha A.M., Kishitskii A.A. The role of carbonate additives in the processes of hydration and hardening of composite Portland cements. *Polzunovskii al'manakh*. 2021. No. 1, pp. 74–76. (In Russian).
21. Ilina L., Kudyakov A., Rakov M. Aerated dry mix concrete for remote northern territories. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 5 (113). Article No. 11310. DOI: 10.34910/MCE.113.10

УДК 691.542

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>

М.М. СУРОВЦОВ, канд. техн. наук, Д.Д. ХАМИДУЛИНА, канд. техн. наук (loza_mgn@mail.ru),
С.А. НЕКРАСОВА, канд. техн. наук, Ю.А. МОРЕВА, канд. техн. наук

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем

Представлены результаты проведенных исследований цементного вяжущего с добавлением тонкомолотого доменного гранулированного шлака и бетонов на его основе. Данный материал находит применение в строительстве в качестве активной минеральной добавки, улучшающей структуру бетона, а также позволяет снижать стоимость его производства. Приведены результаты подбора состава бетона класса В25, как на цементном вяжущем, так и с использованием молотого шлака. Получены физико-механические характеристики бетонной смеси и бетона. В результате испытания контрольных образцов выявлено, что добавление шлака в интервале до 30% позволяет достигать требуемых показателей предела прочности при сжатии. Кинетика набора прочности бетона показывает, что на начальном этапе введения шлака в цемент снижается скорость набора прочности (1–7 сут), но в дальнейшем, к марочному возрасту 28 сут темпы набора прочности образцов без добавления и с добавлением шлака в цемент в интервале 10–50% постепенно выравниваются. Следует отметить, что в возрасте 56 и 90 сут контрольные образцы всех серий показывают результаты, соответствующие марочной прочности соответствующих серий. Данное обстоятельство позволяет судить о возможности использования молотого доменного гранулированного шлака в бетонах при производстве строительных конструкций как заводского изготовления, так и при производстве монолитных работ на строительной площадке.

Ключевые слова: отходы производства, молотый доменный гранулированный шлак, активная минеральная добавка, цементное вяжущее, экономия цемента, прочность бетона.

Для цитирования: Суровцов М.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Морева Ю.А. Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 43–48.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>

M.M. SUROVTSOV, Candidate of Sciences (Engineering), D.D. KHAMIDULINA, Candidate of Sciences (Engineering),
S.A. NEKRASOVA, Candidate of Sciences (Engineering), Y.A. MOREVA, Candidate of Sciences (Engineering)
Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin Avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)

Use of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Cement Binder

The article presents the results of studies of cement binder with the addition of fine ground granulated blast furnace slag and concretes on its basis. This material finds its use in construction as an active mineral additive that improves the structure of concrete, and also allows you to reduce the cost of its production. The results of the selection of the composition of concrete of class B25, both on cement binder and with the use of ground slag are presented. Physical and mechanical characteristics of concrete mixture and concrete are given. As a result of tests of control samples it has been revealed, that the addition of slag in the interval up to 30% allows to reach the required indicators of the limit of strength in compression. The kinetics of gain of strength of concrete shows, that at the initial stage of the introduction of slag in cement reduces speed of gain of strength (1–7 days), but further, by the vintage age of 28 days speed of gain of strength of samples without addition and with the addition of slag in cement in the range 10–50% gradually are leveled. It should be noted that at the age of 56 and 90 days the control specimens of all the series show the results corresponding to the vintage strength of the respective series. This circumstance allows to judge about the possibility of using ground granulated blast-furnace slag in concrete in the production of building structures both in the factory and in the production of monolithic works at the construction site.

Keywords: industrial waste, ground granulated blast furnace slag, active mineral additive, cement binder, cement savings, concrete strength.

For citation: Surovtsov M.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Moreva Y.A. Use of ground granulated blast furnace slag in cement binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 43–48. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>

Добыча полезных ископаемых — одна из важнейших отраслей промышленности, которая влияет на экономику и техническое развитие нашей страны. Горнодобывающие предприятия являются основной базой, формирующей бюджет России. На нашей территории разведано более 20 тыс. месторождений полезных ископаемых. По приблизительным оценкам, их стоимость по запасам ресурсов составляет около 30 трлн дол. США. Среди ископаемых, добываемых в России, в первую очередь стоит отметить природный газ, нефть, уголь, горючие сланцы. Насчитывается большое количество месторождений цветных метал-

лов, железных и титановых руд. Отдельную нишу занимают золото, серебро, платина, уран, углеводороды и многие другие полезные ископаемые. На рис. 1 в общем виде представлен перечень основных ископаемых, добываемых на территории Российской Федерации.

Россия уникальна по своим природным запасам, что предоставляет прекрасную возможность для эффективного развития любой сферы производства. Однако, как и любая другая отрасль, добыча полезных ископаемых имеет ряд проблем, среди которых нельзя не отметить пагубное влияние на окружающую среду.



Рис. 1. Полезные ископаемые, добываемые в России
Fig. 1. Mineral resources mined in Russia

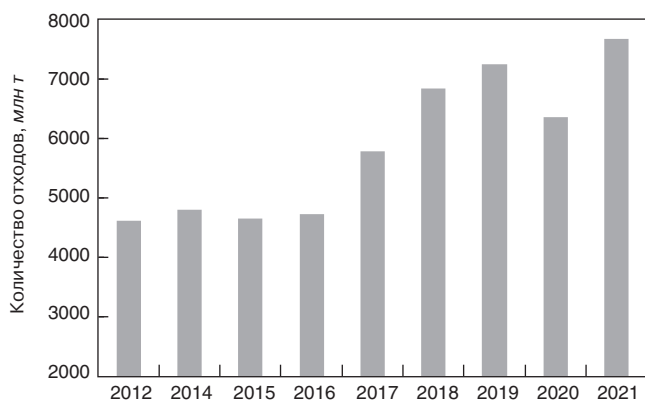


Рис. 2. Динамика количества отходов, образующихся в результате добычи полезных ископаемых
Fig. 2. Dynamics of the amount of waste formed as a result of mining

В результате добычи и обогащения полезных ископаемых образуются десятки миллионов кубометров шламов и отвальных пород. Анализ данных, представленных в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» [1] и в сборнике «Промышленное производство в России. 2021» [2], показал, что объем отходов, образующихся в результате добычи полезных ископаемых, за период с 2012 по 2021 г. вырос на 66,1%, с 4629,3 до 7690,5 млн т. Динамика количества отходов, образующихся в результате добычи полезных ископаемых за период с 2012 по 2021 г., представлена на рис. 2.

Основу отходов, образующихся при добыче полезных ископаемых открытым способом, составляют вскрышные породы. Объем таких пород, образующихся при разработке рудных месторождений, обычно значительно превышает объем добываемого полезного ископаемого. Только около 1–2% извлекаемого природного сырья становится готовым продуктом, а большая часть превращается в отходы. Количество вскрышных пород, накопленных на

территории нашей страны в отвалах, исчисляется миллиардами кубических метров. Отвалы вскрышных работ выводят огромные территории из экологического круговорота, загрязняют атмосферу и водные ресурсы. При подземном способе добычи полезных ископаемых попутных пород образуется меньше, чем при открытом, однако и они составляют значительные объемы. Так, например, на одну тонну угля при открытой добыче образуется до 1–5 т вскрышных пород, при подземной – до 0,2–0,3 т шахтных.

Проблема использования отходов добычи имеет большое народнохозяйственное значение. Именно поэтому в настоящее время ей уделяется большое внимание не только в нашей стране, но и во всем мире. Одним из основных принципов государственной политики в области обращения с отходами является комплексная переработка материально-сырьевых ресурсов в целях уменьшения количества отходов. Утилизация и использование отвальной породы – одно из направлений прекращения вредного воздействия на окружающую среду и восстановления ландшафтов.

Использование отходов горно-металлургического производства в строительстве

Вскрышные и попутно извлекаемые породы при добыче полезных ископаемых содержат разнообразные компоненты, являющиеся ценным сырьем для промышленности строительных материалов. Наибольшее распространение в нашей стране получило прямое (без дополнительной подготовки) использование горной массы в качестве строительного материала.

По мнению авторов [3, 4], производство строительных материалов на основе утилизации породных отходов характеризуется следующими технико-экономическими преимуществами:

- замена привозного сырья на местное позволяет расширить сырьевую базу;
- близкое расположение мест производства и потребления строительных материалов приводит к снижению транспортных расходов на перевозку сырья;
- концентрация добычи различных видов минерального сырья на одном предприятии;
- уменьшение затрат на добычу, дробление и помол исходного сырья.

В современных условиях строительства, когда одним из ключевых факторов на строительной площадке становится стоимость материалов, экономия цементного вяжущего является важной и актуальной задачей. Одним из путей в части экономии цемента является замещение на тонкомолотый гранулированный доменный шлак [5–10].

Данный материал достаточно хорошо изучен как активная минеральная добавка в цементы, кроме того, доменный шлак является основным компонентом при получении шлакощелочных вяжущих и изделий на их основе [11–14].

Таблица 1
Table 1Составы бетонов
Concrete compositions

Компонент бетонной смеси, кг/м ³	Экономия цемента (доля замещения цемента шлаком)					
	К (0%)	10%	20%	30%	40%	50%
Цемент	340	306	272	238	204	170
Шлак	–	41	82	122	163	204
Σ вяжущее	340	347	354	360	367	374
Щебень	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Песок	850	843	836	830	823	816
Вода	183	173	170	170	175	200
Пластификатор ReoTeck™ (0,6%)	2,04	2,08	2,12	2,16	2,2	2,24

Таблица 2
Table 2Физико-механические характеристики бетонной смеси
Physical and mechanical characteristics
of the concrete mixture

Параметр	Экономия цемента (доля замещения цемента шлаком)					
	К (0%)	10%	20%	30%	40%	50%
Плотность, кг/м ³	2463	2474	2439	2448	2441	2436
Осадка конуса, см	16	16	19	18	16	20
Воздухововле- чение, %	2,4	2,4	1,7	1,7	2	1,6
Сохраняемость бетонной смеси во времени, ч	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Область применения доменного шлака достаточно широка [3, 15–18]:

1. Молотый доменный гранулированный шлак применяется для изготовления растворов и бетонов, в производстве сухих строительных смесей, в гидротехническом, сельскохозяйственном, дорожном строительстве, а также в строительстве промышленных, общественных и жилых зданий, в изготовлении искусственного конгломерата.

2. Молотый доменный шлак применяется для получения различных видов цемента. При получении клинкерных цементов молотый шлак используют как добавку. При получении бесклинкерных цементов молотый шлак применяется как основной компонент. В качестве бесклинкерных цементов могут выступать шлакощелочные цементы.

3. Доменный молотый шлак применяется как частичный заменитель портландцемента при производстве легких бетонов для производства ячеистых и пенополистиролбетонных блоков. Наиболее эффективен при производстве строительных блоков автоклавным методом при тепловлажностной обработке.

К преимуществам использования доменного шлака следует отнести:

1. Использование молотого гранулированного шлака при изготовлении бетона позволяет сократить расход клинкерного цемента без уменьшения прочностных показателей.

2. Экономия исходного портландцемента колеблется в широких пределах – от 20 до 70%. Процент замещения зависит от факторов: активность портландцемента, состав бетона, зерновой состав песка, условия уплотнения бетонной смеси, температура и продолжительность ТВО и пр.

3. Применение ТВО, электропрогрева значительно увеличивает прочностные характеристики конструкций.

4. Молотый шлак является микрозаполнителем, способствующим улучшению структуры строительно-технических свойств бетонов, улучшающим поверхность изделия.

5. Замещение портландцемента молотым шлаком в количестве 20–50% в составе бетона приводит к устойчивому повышению морозостойкости пропариваемого изделия.

Молотый шлак применяется для получения различных видов цемента, для изготовления растворов и бетонов в различных видах строительства, ЖБИ, а также для производства сухих строительных смесей.

Одним из ключевых моментов является определение оптимальной дозировки шлака для замещения вяжущего при приготовлении бетонной смеси с требуемыми характеристиками.

Определение оптимальной дозировки шлака для замещения цемента

Для подбора состава бетонной смеси и определения оптимальной дозировки шлака были использованы следующие исходные материалы:

– инертные заполнители: песок природный производства ООО «Трест Магнитострой УПИМ-1», щебень фр. 5(4)–20(16) мм, марка по дробимости не ниже 1000 по ГОСТ 8267–83, производства Гумбейский щебеночный комплекс ООО «Энерго-Альянс»;

– портландцемент типа ЦЕМ I класса прочности 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 производства «Dyckerhoff» (г. Сухой Лог);

– шлак доменный гранулированный молотый производства ООО «Мечел-Материалы» по ТУ 38.32.22-012-99126491–2017 «Добавка минеральная активная для производства бетонов, растворов и сухих строительных смесей Green Cems GGBS-450 (шлак доменный гранулированный молотый). Технические условия».

В качестве базового состава был принят бетон В25 W6 F200, подвижность П4, при изготовлении которого использовался пластификатор на базе поликарбонатных эфиров ReoTeck™ DR 8200.

Расчет состава бетона производился методом абсолютных объемов с целью получения необходимых свойств бетона в конструкциях, установленных госу-

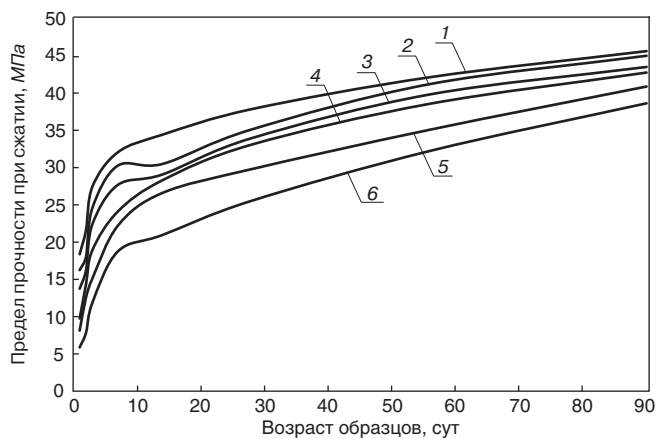


Рис. 3. Результаты испытаний исследуемых образцов: 1 – контрольный; 2 – 10%; 3 – 20%; 4 – 30%; 5 – 40%; 6 – 50%

Fig. 3. Test results of the studied sample: 1 – control; 2 – 10%; 3 – 20%; 4 – 30%; 5 – 40%; 6 – 50%

дарственными стандартами, техническими условиями и проектной документацией на эти конструкции при минимальном расходе цемента.

При проведении предварительного подбора состава бетонной смеси диапазон расхода цемента составил 310–360 кг/м³ для бетона класса В25. Исходя из требуемых показателей прочности, удобоукладываемости и других физико-механических характеристик оптимальным признан расход 340 кг/м³.

Подбор состава при замещении шлаком осуществлялся пропорциональным снижением расхода цемента (по массе). В качестве контрольного использовался состав, в котором вяжущим веществом является портландцемент (данный состав имеет условное обозначение «К»).

Дозировка молотого шлака с целью замещения цемента варьируется в пределах 10–50% с шагом в 10%. Однако ввиду меньшей активности молотого шлака по сравнению с цементом для достижения требуемой прочности бетона количество шлака, замещающего цемент, было увеличено на 20%. При этом состав корректировался в части пропорционального снижения количества мелкого инертного заполнителя – песка.

Таким образом, в результате предварительно проведенного подбора был определен оптимальный состав бетонной смеси для бетона класса В25 (табл. 1).

Для определения прочности при сжатии были изготовлены бетонные образцы-кубы размером 100×100×100 мм и призмы для определения прочности при изгибе размером 100×100×400 мм.

В процессе приготовления бетонной смеси фиксировались физико-механические характеристики, которые приведены в табл. 2. Испытания были проведены в соответствии с ГОСТ 10181–2014.

Плотность бетонной смеси для различной дозировки шлака находится в диапазоне 2436–2474 кг/м³, т. е. подобранные смеси относятся к тяжелому бетону.

Осадка конуса (ОК) соответствует подвижности П4 16–20 см по ГОСТ 10181–2014.

Сохраняемость смеси не более 1 ч, после чего ОК не соответствует подвижности П4.

Полученные результаты

Для определения оптимальной дозировки при сохранении необходимых физико-механических характеристик были проведены испытания контрольных образцов-кубов на прочность при сжатии в возрасте 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 и 90 сут. Испытания контрольных образцов всех серий производились в соответствии с ГОСТ 10180–2012.

Графически результаты испытаний исследуемых образцов бетона в различном возрасте приведены на рис. 3.

Для бетона класса В25 предел прочности при сжатии контрольных образцов в возрасте 28 сут должен составлять не менее 32,7 МПа. Использование пластификатора на базе поликарбоксилатных эфиров ReoTeck™ DR 8200 позволило снизить количество воды при прежнем расходе цемента, что положительным образом отобразилось на прочности при сжатии контрольных образцов. Предел прочности контрольных образцов, испытанных в возрасте 28 сут, превышает требуемый для класса бетона В25 уровень в 32,7 МПа для серии «К» (без замещения цемента шлаком), а также при замещении в интервале 10–30%.

Проведенные испытания контрольных образцов бетона для составов класса В25 показали, что замещение цемента шлаком в интервале до 30% позволяет достигать требуемых показателей предела прочности при сжатии в 32,7 МПа. Следовательно, дозировка в 30% является оптимальной.

Заключение

Проведенные испытания показали, что условия приготовления бетонных смесей при замещении доли цемента шлаком по сравнению с базовым составом (обозначение «К») не отличаются усложнением технологии. Для разработанных составов сохраняемость бетонной смеси составила не более одного часа, поэтому время транспортировки с момента приготовления смеси до формовки изделий либо конструкций должно составлять не более 0,5 ч. Иные показатели бетонной смеси, при замещении доли цемента шлаком, такие как удобоукладываемость и подвижность бетонной смеси, водоотделение и раствороотделение, воздухоовлечение, существенно образом не отличаются от исходного. При соблюдении методики приготовления бетонной смеси данные показатели близки к показателям базового состава.

Замещение клинкерного цемента при приготовлении бетонной смеси молотым гранулированным шлаком в пределах 10–30% позволяет получать экономично без ухудшения физико-механических показателей.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 685 с.
2. Власенко Н.А., Зарубина Е.В., Клевакина М.П. и др. Промышленное производство в России. 2021: Статистический сборник. М.: Росстат; 2021. 305 с.
3. Воронин К.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Трубкин И.С. Вибропрессованные элементы мощения с использованием сталеплавильных шлаков // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 71–73.
4. Починков И.В., Мясков А.В. Анализ существующих методов использования и переработки отходов угледобычи // *Научный вестник Московского государственного горного университета*. 2013. № 5. С. 76–82.
5. Корниенко П.В., Гакштетер Г.В. Изготовление современных высокофункциональных бетонов на основе сталеплавильных шлаков // *Технологии бетонов*. 2013. № 3. С. 47–49.
6. Мечай А.А., Барановская Е.И., Ласанкин С.В. Автоклавный ячеистый бетон с использованием электросталеплавильного шлака // *Труды БГТУ*. Минск: БГТУ, 2011. № 3 (141). С. 84–87.
7. Чазов А.В., Шишмакова М.С. Шлакощелочные материалы в дорожном строительстве // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 1. С. 114–117.
8. Леденев А.А., Перцев В.Т., Судани Д.Р.А. Комплексные модификаторы полифункционального действия для придания бетонам специальных свойств // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2014. № 1 (8). С. 56–63.
9. Панкова Т.А., Дасаева З.З. Применение гранулированных шлаков при получении строительных материалов. В сборнике: *Научные открытия в эпоху глобализации*. Казань, 2015. С. 154–156.
10. Дробный О.Ф., Харлов А.А., Прошкина О.Б. Отдельные направления утилизации техногенных ресурсов магнитогорского промышленного района // *Минералогия техногенеза*. 2009. Т. 10. С. 228–234.
11. Артамонова А.В., Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения // *Цемент и его применение*. 2011. № 4. С. 108–113.
12. Петрова Т.М., Смирнова О.М., Фролов С.Т. Свойства пластифицированных композиций портландцемента – доменный шлак с учетом электроповерхностных явлений // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 2. С. 118–123.

References

1. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021. Draft State Report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2022. 685 p. (In Russian).
2. Vlasenko N.A., Zarubina E.V., Klevakina M.P. etc. Industrial production in Russia. 2021: Statistical compendium. Moscow: Rosstat; 2021. 305 p. (In Russian).
3. Voronin K.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Trubkin I.S. Vibro-pressed elements of paving with the use of steelmaking slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 71–73. (In Russian).
4. Pochinkov I.V., Myaskov A.V. Analysis of existing methods for the use and processing of coal mining waste. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2013. No. 5, pp. 76–82. (In Russian).
5. Kornienko P.V., Gaksteter G.V. Production of modern highly functional concretes based on steel-smelting slags. *Tekhnologii betonov*. 2013. No. 3, pp. 47–49. (In Russian).
6. Mechai A.A., Baranovskaya E.I., Lasankin S.V. Autoclave cellular concrete using electric steel-smelting slag. *Trudy BSTU* (Minsk). 2011. No. 3 (141), pp. 84–87. (In Russian).
7. Chazov A.V., Shishmakova M.S. Slag-alkaline materials in road construction. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2012. No. 1, pp. 114–117. (In Russian).
8. Ledenev A.A., Pertsev V.T., Sudani D.R.A. Complex modifiers of polyfunctional action to give concrete special properties. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2014. No. 1 (8), pp. 56–63. (In Russian).
9. Pankova T.A., Dasaeva Z.Z. The use of granulated slags in the production of building materials. *In the collection: Scientific discoveries in the era of globalization*. Kazan. 2015, pp. 154–156. (In Russian).
10. Drobny O.F., Kharlov A.A., Proshkina O.B. Separate directions of utilization of technogenic resources of the Magnitogorsk industrial region. *Mineralogiya tekhnogeneza*. 2009. Vol. 10, pp. 228–234. (In Russian).
11. Artamonova A.V., Voronin K.M. Slag-alkaline binders based on blast-furnace granulated slags of centrifugal impact grinding. *Tsement i yego primeneniye*. 2011. No. 4, pp. 108–113. (In Russian).
12. Petrova T.M., Smirnova O.M., Frolov S.T. Properties of plasticized compositions of Portland cement-blast-furnace slag taking into account electro-surface phenomena. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No. 2, pp. 118–123. (In Russian).
13. Rakhimova N.R. Influence of additives of ground broken ceramic bricks on the composition and microstructure of a composite slag-alkali binder stone.

13. Рахимова Н.Р. Влияние добавок молотого боя керамического кирпича на состав и микроструктуру камня композиционного шлакощелочного вяжущего // *Башкирский химический журнал*. 2007. Т. 14. № 4. С. 83–86.
14. Кузьменко А.М., Петлеваний М.В., Усатый В.Ю. Влияние тонкоизмельченных фракций шлака на прочностные свойства твердеющей закладки. *Conference: School of Underground Mining*. Yalta. 2010.
15. Фельдраппе Ф., Эренберг А. Разработка новых цементов типа СЕМ X на основе молотого гранулированного доменного шлака, золы-уноса и портландцементного клинкера // *Цемент и его применение*. 2014. № 4. С. 34–39.
16. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З., Фатыхов Г.А., Кузнецов Д.П. Влияние добавок молотых компонентов мелкозернистого бетона на свойства композиционных шлакощелочных вяжущих // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 8. С. 11–15.
17. Ефремов А.Н., Лищенко А.Н. Влияние добавок шлака и золы-уноса ТЭС на жаростойкие свойства портландцементного камня // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2010. № 1. С. 221–225.
18. Шляхова Е.А., Шляхов М.А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2015. Т. 38. № 4–1. С. 89.
- Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*. 2007. Vol. 14. No. 4, pp. 83–86. (In Russian).
14. Kuzmenko A.M., Petlevany M.V., Usatii V.Yu. Influence of finely divided slag fractions on the strength properties of a hardening backfill. *Conference: School of Underground Mining*. Yalta. 2010. (In Russian).
15. Feldrappe F., Ehrenberg A. Development of new CEM X type cements based on ground granulated blast-furnace slag, fly ash and Portland cement clinker. *Tsement i yego primeneniye*. 2014. No. 4, pp. 34–39. (In Russian).
16. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Fatykhov G.A., Kuznetsov D.P. Influence of additives of ground components of fine-grained concrete on the properties of composite slag-alkali binders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2009. No. 8, pp. 11–15. (In Russian).
17. Efremov A.N., Lishchenko A.N. Influence of additives of slag and fly ash from thermal power plants on the heat-resistant properties of Portland cement stone. *Vestnik of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2010. No. 1, pp. 221–225. (In Russian).
18. Shlyakhova E.A., Shlyakhov M.A. Influence of the type of mineral additive of microfiller on the properties of fine-grained concrete. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2015. Vol. 38. No. 4–1, p. 89.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»**

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеровалентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.

**Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»**

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.

**Заказать литературу можно через редакцию
по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: mail@rifsm.ru,
или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-49-53>

Б.А. БОНДАРЕВ¹, д-р техн. наук (gidkov_vova1999@mail.ru);
 М.Ш. САЛАМАНОВА², д-р техн. наук (madina_salamanova@mail.ru),
 З.Х. ИСМАИЛОВА², канд. техн. наук (ismailova-z-h@mail.ru)

¹ Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30)

² Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова (364021, г. Грозный, пр. Исаева, 100)

Новые возможности применения некондиционного сырья в строительстве

Опустынивание огромных территорий юга Восточно-Европейской равнины, и в частности северо-восточной части Чеченской Республики, требует особого внимания к вопросам возможного применения практически не используемых в строительстве барханных песков, объемы которых находятся в неограниченном количестве. Известный мировой промышленный опыт по внедрению барханных песков, отличающихся наличием пылевидных фракций с размером частиц менее 0,1 мм, позволит найти принципиально новые подходы для получения конкурентоспособной и качественной продукции. Особенно это уместно для дорожного строительства, ведь в нашей стране реализация новых проектов с использованием нетрадиционных материалов не нашла практического применения. Проблемы автомобильных дорог были во все времена и занимают ключевое положение в развитии отечественной экономики, так как на них осуществляется до 90% народнохозяйственных перевозок всевозможными видами дорожного транспорта. Поэтому разработка технологии по усилению оснований дорожных одежд материалами, укрепленными композиционными вяжущими на барханных песках, является актуальной задачей, позволяющей расширить сырьевой ресурс строительной отрасли, улучшая тем самым техническое состояние автомагистралей.

Ключевые слова: барханные пески, композиционное вяжущее, механохимическая активация, удельная поверхность, минеральный наполнитель.

Для цитирования: Бондарев Б.А., Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х. Новые возможности применения некондиционного сырья в строительстве // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-49-53>

B.A. BONDAREV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (gidkov_vova1999@mail.ru);

M.Sh. SALAMANOVA², Doctor of Sciences (Engineering) (madina_salamanova@mail.ru),

Z.Kh. ISMAILOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (ismailova-z-h@mail.ru)

¹ Lipetsk State Technical University (30, Street Moskovskaya, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

² Grozny State Oil Technical University named after M.D. Millionshikov (100, Avenue Isaev, Grozny, 364021, Russian Federation)

New Possibilities for the Application of Unconditional Raw Materials in Construction

The desertification of vast territories in the south of the East European Plain, and in particular the northeastern part of the Chechen Republic, requires special attention to the possible use of dune sands, practically unused in construction, the volumes of which are in an unlimited number. The well-known world industrial experience in the introduction of dune sands, characterized by the presence of dusty fractions with a particle size of less than 0.1 mm, will make it possible to find fundamentally new approaches to obtain competitive and high-quality products. This is especially relevant for road construction, because in our country the implementation of new projects using non-traditional materials has not found practical application. The problems of roads have been at all times and occupy a key position in the development of the domestic economy, since they carry out up to 90% of the national economic transportation by various types of road transport. Therefore, the development of technology to strengthen the foundations of pavements with materials reinforced with composite binders on dune sands is undoubtedly an urgent task that allows expanding the raw material resource of the construction industry, thereby improving the technical condition of highways.

Keywords: dune sands, composite binder, mechanochemical activation, specific surface area, mineral filler.

For citation: Bondarev B. A., Salamanova M. Sh., Ismailova Z.Kh. New possibilities for the application of unconditional raw materials in construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-49-53>

Нерациональное использование природных ископаемых привело к дефициту и истощению сырьевой базы для получения такой незаменимой в строительстве продукции, как щебень, песок, цемент и другие материалы. Для восполнения этой ниши и решения возникающих технологических проблем необходимо найти максимальное применение существующему в природе резерву [1–5]. А учитывая повсеместное распространение барханных песков, на огромных территориях юга Восточно-Европейской равнины, и в частности северо-восточной части Чеченской Республики с характерным степным,

жарким, засушливым климатом, требуется уделить особое внимание изучению возможного применения этого практически неупотребляемого, но неограниченного в объемах материала в строительстве. Известный промышленный опыт стран Центральной Азии по применению барханных песков, отличающихся наличием пылевидных фракций с размером частиц менее 0,1 мм, позволит найти принципиально новые подходы для создания конкурентоспособной и качественной продукции [6–9].

Особенно это уместно для дорожного строительства, ведь в нашей стране реализация новых проектов

с использованием нетрадиционных материалов не нашла практического применения. Проблемы автомобильных дорог были во все времена и занимают ключевое положение в развитии отечественной экономики, так как на них осуществляется до 90% народнохозяйственных перевозок всевозможными видами дорожного транспорта. Поэтому разработка технологий по устройству оснований дорожных одежд материалами, укрепленными композиционными вяжущими на барханных песках, является несомненно актуальной задачей и позволит открыть новые возможности доступному и безграничному ресурсу, повышая тем самым техническое состояние автомобильных сетей [9–15].

В соответствии с выдвинутой концепцией была поставлена цель, заключающаяся в получении композиционных материалов с использованием механохимической активации компонентов вяжущей системы, наполненной тонкодисперсным порошком из барханных песков. В исследованиях применялись портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, производитель ГУП «Чеченцемент»; барханные пески месторождения Шелковская; продукт конденсации меламинасульфокислоты и формальдегида химического модификатор С-3, производитель «Оргсинтез» г. Новомосковск.

Минералогический состав барханного песка показал существенное отличие от речных, отмечено присутствие таких минералов, как кальцит, доломит (обнаружено методом вскипания при контакте с 10% соляной кислотой) – 11,1%, кварц – до 60%, глинистые примеси – 19%, полевые шпаты – 5%, слюда – до 8%, остальное органические включения.

Предварительно подготовленные пробы барханного песка исследовались на дисперсионно-энергетическом спектрометре растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200i с интегрированной системой микроанализа Genesis Apex 2 EDS от EDAX. Обработка полученных спектров осуществлялась при помощи программного ресурса EDAX TEAM. Энергодисперсионный микроанализ исследуемой пробы барханного песка представлен на рис. 1.

Химический состав зерен барханного песка выражен следующим оксидным составом, мас. %: MgO=2,41; Al₂O₃=7,81; SiO₂=59,54; K₂O=1,44; CaO=17,52; Fe₂O₃=2,6; Na₂O=1,35; SO₃=0,21; потери при прокаливании составили 7,12.

Визуальный осмотр материала позволил отметить серовато-желтоватый окрас зерен барханного песка с характерным присутствием прозрачного и замутненного кварца. Анализ результатов сканирующей микроскопии подтвердил наличие частиц неправильной геометрической конфигурации, местами округлой, сглаженной поверхности, имеется небольшое количество частиц остроугольной формы (рис. 2).

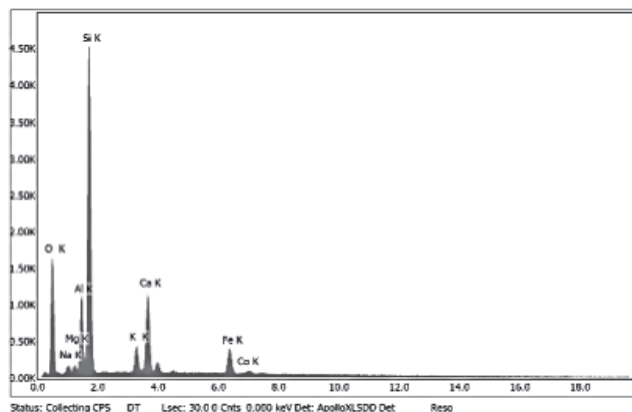


Рис. 1. Энергодисперсионный микроанализ барханного песка
Fig. 1. Energy dispersive microanalysis of dune sand

Таблица 1
Table 1

Основные физико-механические показатели
пробы барханного песка
Main physical and mechanical parameters
of dune sand samples

Размер сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	<0,14
Полные остатки, %	–	3,5	6,2	9,3	41	59
Модуль крупности	0,6					
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	5,4					
Истинная плотность, кг/м ³	2310					
Средняя насыпная плотность, кг/м ³	1390					
Пустотность песка, %	48					
Водопотребность, %	12					

Определение физико-механических свойств исследуемого материала проводили согласно ГОСТ 8736–93 «Песок для строительных работ. Технические условия». Результаты исследований приведены в табл. 1.

Результаты исследования показали, что рассматриваемый песок относят к разряду тонких, модуль крупности 0,6; наличие пылевидной и глинистой составляющих превышает норму на 80%; насыпная и истинная плотности ниже традиционно применяемых в строительстве песков. Пустотность и соот-

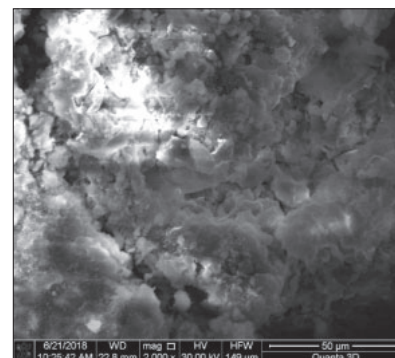
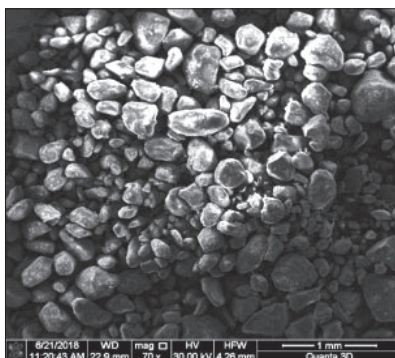


Рис. 2. Микрофотографии частиц пробы барханного песка
Fig. 2. Micrographs of sand dune sample particles

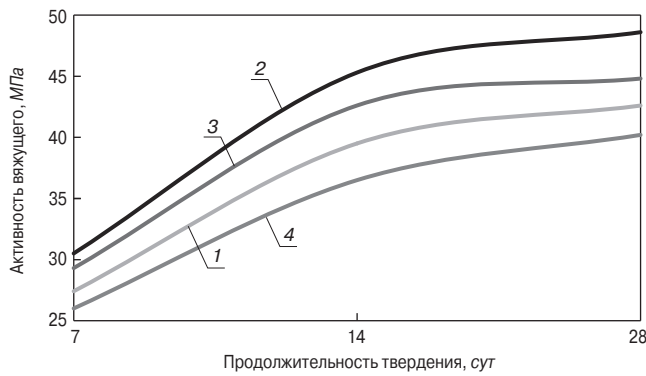


Рис. 3. График зависимости активности вяжущих от продолжительности твердения: 1 – ПЦ; 2 – ПЦ-80; 3 – ПЦ-90; 4 – ПЦ-70
Fig. 3. Graph of the dependence of the activity of binders on the duration of hardening: 1 – PC; 2 – PC-80; 3 – PC-90; 4 – PC-70

ответственно водопотребность достаточно высоки. Следовательно, данный материал нецелесообразно использовать в качестве мелкого заполнителя в бетон, но если рассмотреть вариант использования его компонентом вяжущей связки, при условии механохимического воздействия, то вполне вероятно проявится кольматирующий эффект, способствующий созданию плотного и непроницаемого конгломерата.

Для проведения эксперимента были приготовлены серии вяжущих связок «портландцемент – барханский песок – С-3», в которых варьировалось содержание компонентов в зависимости от степени наполнения системы. Собранные в нужном количестве порошки подвергали тонкому измельчению в роликовой мельнице МЛР-15 в течение 10 мин, после чего определяли истинную плотность, удельную поверхность и активность полученных вяжущих композиций (ГОСТ 310.2–76 «Цементы. Методы определения тонкости помола»; ГОСТ 310.3–76 «Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема»; ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии»). Рецептуры и свойства вяжущих связок представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением доли наполнителя в связке истинная плотность уменьшается на 5–8%; числовое значение удельной поверхности порошков повышается при степени наполнения 20–25%, а потом начинает снижаться, и связано это со сравнительно высокой долей барханского песка в системе; нормальная плотность цементного теста минимальна при 10%-м содержании барханского песка в связке. Снижение водопо-

требности – результат механохимической обработки вяжущей порошкообразной композиции, а именно совместный тонкий помол суперпластификатора С-3 с другими компонентами системы способствует снижению этого параметра.

Для определения активности полученных вяжущих материалов были изготовлены стандартные образцы-балочки размером 40×40×160 мм на цементно-песчаном растворе консистенции 1:3 с использованием вольского монофракционного песка. После распалубки образцы твердели в водной среде, затем по прошествии определенного периода испытывались на гидравлическом прессе. Результаты исследований приведены в виде кривых зависимостей активности вяжущего от продолжительности твердения (рис. 3).

Проведенные исследования показали эффективность механохимической активации вяжущей связки «портландцемент–барханский песок 20%–С-3»: прочность цементного камня на 28-е сут твердения достигла 48,6 МПа. Благодаря комплексному действию минерального наполнителя из барханского песка в количестве 20% и химического модификатора 1% создается плотная структура, за счет присутствия минералов каолинита и монтмориллонита происходит кольматация порового пространства с развитием непроницаемого цементного камня. Именно образцы этого состава вяжущего исследовались на растровом электронном микроскопе Quanta 3D (рис. 4). Полученные микрофотографии при различных увеличениях подтвердили достаточ-

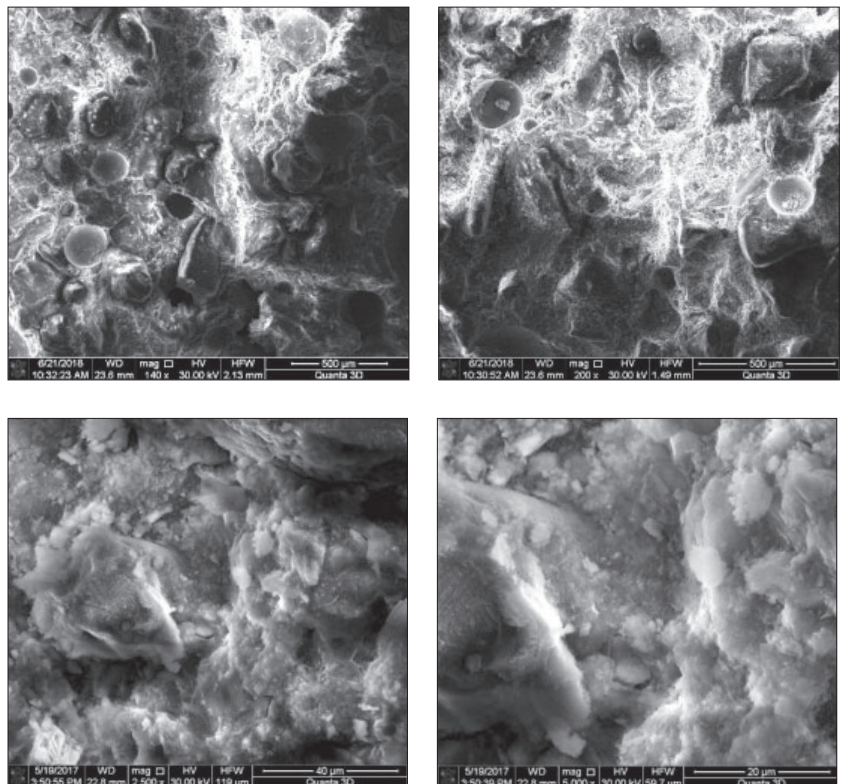


Рис. 4. Микрофотографии цементного камня на ПЦ-80 при различном увеличении
Fig. 4. Micrographs of cement stone at PC-80 at various magnifications

Таблица 2
Table 2

Рецептуры композиционных вяжущих
Formulations of composite binders

Вяжущее	Содержание компонентов вяжущего, %			Истинная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /кг	Нормальная густота, %
	ПЦ	Барханный песок	С-3			
ПЦ	100	–	–	3,09	337	25
ТМВ-90	89	10	1	2,98	394	18,1
ТМВ-80	79	20	1	2,86	452	19,2
ТМВ-70	69	30	1	2,82	446	20,4

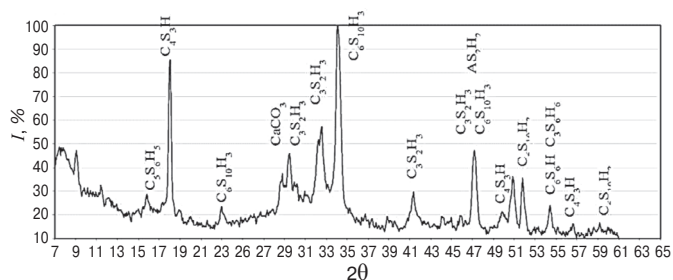


Рис. 5. Рентгенограмма цементного камня на вяжущем ПЦ-80
Fig. 5. Radiograph of the cement stone on the binder PC-80

но высокую плотность структуры, обеспеченную высоким содержанием гидратных соединений силикатов и алюминатов кальция в стесненном объеме. Присутствие химического модификатора на поверхности компонентов вяжущего замедляет сроки схватывания системы и способствует более медленному взаимодействию клинкерных минералов с водой, растворению частиц наполнителя с раскрытием активных центров кристаллизации, что обуславливает формирование новой порции труднорастворимых и прочных соединений. Результаты рентгенофазового структурного анализа (РФА) представлены на рис. 5.

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 289 с.
2. Баженов Ю.М. Бетон: технологии будущего // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2009. № 8. С. 29–32.
3. Hillemeier B., Buchenau G., Herr, R., Huttli R., Klubendorf St., Schubert K. *Spezialbetone Betonkalender*. Ernst&Sohn. 2006. No. 1, pp. 534–549.
4. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г. Влияние тонкодисперсных микронаполнителей из вулканического пепла на свойства бетонов. Сборник статей международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». 24–26 марта 2015, г. Грозный. Т. 1. С. 171–176.

Рентгенограмма образца цементного камня ПЦ-80 позволяет отметить присутствие пиков, принадлежащих гидросиликатам кальция, которые по своей структуре сходны с минералами афвиллитом $C_3S_2H_3$ (1,924; 2,44 Å), фошагитом C_4S_3H (1,82; 1,55 Å), к тому же присутствуют пики тоберморитоподобных гидросиликатов кальция $C_5S_6H_5$ (5,6; 1,83 Å) и минералов гиrolитовой группы трукоттит $C_6S_{10}H_3$ (3,8; 2,63; 1,921; 1,762; 1,557 Å), гидрокарбосульфалюминатов кальция. Формирование значительного количества гидратных нерастворимых соединений обусловлено связыванием портландита и клинкерных минералов активными составляющими минерал-групп барханного песка, что положительно отразилось на качественных показателях цементного камня.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что выдвинутая гипотеза по использованию некондиционного материала в строительстве позволит расширить сырьевую базу и получать менее затратную и качественную продукцию. Предлагаемое авторами композиционное вяжущее с использованием барханных песков позволит укреплять основания дорожных настилов, открывая новые возможности доступному ресурсу и повышая качество автомобильных дорог.

References

1. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.C., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony* [Modified high-quality concrete]. Moscow: ASV. 2006. 289 p.
2. Bazhenov Yu.M. Concrete: technologies of the future. *Stroitel'stvo: novye tekhnologii – novoe oborudovanie*. 2009. No. 8, pp. 29–32. (In Russian).
3. Hillemeier B., Buchenau G., Herr, R., Huttli R., Klubendorf St., Schubert K. *Spezialbetone Betonkalender*. Ernst&Sohn. 2006. No. 1, pp. 534–549.
4. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Bisultanov R.G. Influence of finely dispersed microfillers from volcanic ash on the properties of concrete. *Collection of articles of the international scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov*. March 24–26, 2015. Grozny. Vol. 1, pp. 171–176. (In Russian).

5. Калашников В.И. Промышленность неметаллических строительных материалов и будущее бетонов // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 20–24.
6. Гаркави М.С., Якубов В.И. Отсевы дробления – эффективный способ повышения качества бетонов // *Строительные материалы*. 2006. № 11. С. 13–17.
7. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // *Приволжский научный журнал*. 2018. Т. 46. № 2. С. 65–70.
8. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. 2 // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
9. Khater A., Nagar A.M. and Ezzat M. Optimization of alkali activated grog/ceramic wastes geopolymer bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. No. 5 (1), pp. 37–46. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0501005
10. Шлаин И.Б. Разработка месторождений неметаллического сырья. М.: Недра. 1985. 344 с.
11. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Гишлакаева М.И. Использование в мелкозернистых бетонах отходов переработки горных пород. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы», посвященной 10-летию со дня образования КНИИ РАН*. Грозный, 2011. С. 181–184.
12. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of production of fine concretes based on clinkerless binders of alkaline mixing. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. Belgorod. 23–27 September 2019, pp. 385–388.
13. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-grained concretes with clinker-free binders on an alkali gauging. *Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1, pp. 500–503.
14. Khater A., and Gawwad H. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. *Advances in Nano Research*. 2015. Vol. 3. No. 4, pp. 225–242. DOI: <https://doi.org/10.12989/anr.2015.3.4.225>
15. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А. Перспективы использования отходов цементной промышленности для получения современных бетонных композитов // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62>
5. Kalashnikov V.I. Industry of non-metallic building materials and the future of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 20–24. (In Russian).
6. Garkavi M.S., Yakubov V.I. Crushing screenings - an effective way to improve the quality of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 11, pp. 13–17. (In Russian).
7. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects of the use of thermoactivated raw material of aluminosilicate nature. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2018. Vol. 46. No. 2, pp. 65–70. (In Russian).
8. Kapriyelov S.S. Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. Part II. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13. (In Russian).
9. Khater A., Nagar A.M. and Ezzat M. Optimization of alkali activated grog/ceramic wastes geopolymer bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. No. 5 (1), pp. 37–46. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0501005
10. Shlain I.B. Razrabotka mestorozhdenii nerudnogo syr'ya [Development of deposits of non-metallic raw materials] Moscow: Nedra. 1985. 344 p. (In Russian).
11. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Gishlakaeva M.I. Use of rock processing waste in fine-grained concrete. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Science and Education in the Chechen Republic: Status and Prospects", dedicated to the 10th anniversary of the formation of the CI RAS*. Grozny. 2011, pp. 181–184. (In Russian).
12. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of production of fine concretes based on clinkerless binders of alkaline mixing. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. Belgorod. 23–27 September 2019, pp. 385–388.
13. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-grained concretes with clinker-free binders on an alkali gauging. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1, pp. 500–503.
14. Khater A., and Gawwad H. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. *Advances in Nano Research*. 2015. Vol. 3. No. 4, pp. 225–242. DOI: <https://doi.org/10.12989/anr.2015.3.4.225>
15. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A.Kh., Murtazaeva T.S.-A. Prospects for the use of cement industry waste for the production of modern concrete composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 55–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62>

А.М. АЙЗЕНШТАДТ, д-р хим. наук (a.isenshtadt@narfu.ru),
М.А. ФРОЛОВА, канд. хим. наук (m.aizenstadt@narfu.ru),
В.Е. ДАНИЛОВ, канд. техн. наук (v.danilov@narfu.ru),
Т.А. ДРОЗДЮК, канд. техн. наук (t.drozdyuk@narfu.ru),
М.А. МАЛЫГИНА, инженер (m.turobova@narfu.ru)

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

Модификационные превращения сапонитсодержащего материала при механическом помоле

Сапонитсодержащий материал, выделенный из суспензии оборотной воды процесса обогащения кимберлитовых руд Архангельской алмазной провинции, может рассматриваться как перспективное сырье для получения магнезиального цемента. В этой связи важным этапом в цепи модификационных превращений сапонита является трансформация его трехслойной кристаллической решетки в двухслойную, характерную для серпентина. Данный процесс протекает при механическом помоле сапонитсодержащего материала. В работе для подтверждения данного факта использована рассчитанная на основании экспериментальных данных аналоговая величина постоянной Гамакера. Установлено, что при увеличении продолжительности механического диспергирования опытных образцов сапонита происходит приближение данной постоянной к значениям, характерным для серпентина и при длительности помола 60 мин значения аналоговых величин постоянных Гамакера серпентина и механически модифицированного сапонита различаются только на 9%. Исследования проводились на запрессованных образцах порошков сапонитсодержащего материала и серпентина. Для определения аналоговой величины постоянной Гамакера поверхности запрессованных образцов использовался метод Г.А. Зисмана, основанный на определении краевого угла поверхности анализируемых образцов, образованного рабочими жидкостями с известным значением поверхностного натяжения. В качестве рабочих жидкостей использовались водные растворы этанола.

Ключевые слова: сапонитсодержащий материал, серпентин, высокодисперсные минеральные порошки, аналоговая постоянная Гамакера, механический помол.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-23-00047). Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем».

Для цитирования: Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Данилов В.Е., Дроздук Т.А., Малыгина М.А. Модификационные превращения сапонитсодержащего материала при механическом помоле // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-54-59>

A.M. AYZENSHTADT, Doctor of Sciences (Chemistry) (a.isenshtadt@narfu.ru),
M.A. FROLOVA, Candidate of Sciences (Chemistry) (m.aizenstadt@narfu.ru),
V.E. DANILOV, Candidate of Sciences (Engineering) (v.danilov@narfu.ru),
T.A. DROZDYUK, Candidate of Sciences (Engineering) (t.drozdyuk@narfu.ru),
M.A. MALYGINA, Engineer (m.turobova@narfu.ru)

Northern (Arctic) Federal University (NAFU) named after M.V. Lomonosov (22, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

Modification Transformations of Saponite-Containing Material During Mechanical Grinding

The saponite-containing material isolated from a suspension of recycled water of the enrichment process of kimberlite ores of the Arkhangelsk diamond province can be considered as a promising raw material for the production of magnesia cement. In this regard, an important stage in the chain of modification transformations of saponite is the transformation of its three-layer crystal lattice into a two-layer one, characteristic of serpentine. In this case, this process proceeds with mechanical grinding of the saponite-containing material. In order to confirm this fact, the analog value of the Hamaker constant calculated on the basis of experimental data was used. It has been established that with an increase in the duration of mechanical dispersion of experimental samples of saponite, this constant approaches the values characteristic of serpentine, and with a grinding time of 60 min, the values of the analog values of the Hamaker constants of serpentine and mechanically modified saponite differ only by 9%. The studies were carried out on pressed samples of powders of saponite-containing material and serpentine. To determine the analog value of the Hamaker constant of the surface of pressed samples, the method of G.A. Zisman, based on determining the contact angle of the surface of the analyzed samples formed by working fluids with a known value of surface tension was used. Aqueous ethanol solutions were used as working fluids.

Keywords: saponite-containing material, serpentine, highly dispersed mineral powders, Hamaker analog constant, mechanical grinding.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 22-23-00047). The work was performed using the equipment of the unique scientific equipment “Physical chemistry of the surface of nanodispersed systems”.

For citation: Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Danilov V.E., Drozdjuk T.A., Malygina M.A. Modification transformations of saponite-containing material during mechanical grinding. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 54–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-54-59>

Известно, что сапонит представляет собой высокомагнезиальный глинистый минерал, частицы которого имеют крупность 0,4–7 мкм и образуют в водной среде устойчивую суспензию, характеризующуюся низкой скоростью осветления. В процессе обогащения кимберлитовых руд эти песчано-глинистые породы в обводненном состоянии направляются в хвостохранилище, где ежегодно складывается до 4 млн т. Сгущение осадка сапонита методом электролитной коагуляции [1] и последующая консолидация твердой фазы дают возможность его утилизации и дальнейшего использования в качестве компонента строительных материалов различного функционального назначения [2–7]. Отличительной особенностью сапонитов Архангельской алмазной провинции является значительное содержание магния. Перспективность использования магнезиальных отходов для производства вяжущих показана в работах [8, 9].

В исследованиях [10] авторами установлено, что предварительно измельченный до высокодисперсного состояния и обработанный при температуре 900°C сапонит значительно изменяет свои характеристики. Так, высокотемпературная модификация сапонита приводит к уменьшению его удельной площади поверхности, пористости, диаметра пор, влагопоглощения и к увеличению истинной плотности. Данные исследования служат предпосылкой для оптимизации параметров температурного режима процесса получения магнезиального цемента. Определено [10], что процесс механической и температурной модификации сапонита связан с реализацией следующей цепи превращений:

Сапонит → серпентин → форстерит.

Первая стадия процесса, связанная с предварительным механическим разрушением кристаллической структуры сапонита (получение тонкодисперсного порошка сырьевого материала), является определяющей количественный выход форстерита Mg_2SiO_4 (после высокотемпературной модификации серпентина) – конечного минерала для последующего получения магнезиального цемента. С точки зрения кристаллоэнергетики возможное перестроение кристаллической решетки сапонита в серпентин – энергетически выгодный процесс ввиду значительной схожести строения (двухслойная кристаллическая решетка) [11, 12]. Образование из механоактивированного сапонита минералов группы серпентина доказано авторами методом дифференциального термического анализа [10, 13].

В теории молекулярного взаимодействия между микрообъектами Б.В. Дерягиным был предложен метод расчета энергии взаимодействия между частицами в порошковых системах, ее величина связана с природой взаимодействующих частиц, которая характеризуется постоянной Гамакера [14]. В то же время, согласно [15, 16], постоянная Гамакера связана с энергией взаимодействия частиц, разделенных про-

слойкой третьей фазы. Развитые теоретические положения физикохимии поверхностных явлений позволяют с успехом применять метод расчета постоянной Гамакера, основанный на определении и сравнении равновесного краевого угла смачивания (θ_0) поверхности анализируемого материала эталонными (с известным значением поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$) рабочими жидкостями (метод Г.А. Зисмана). В этом случае необходимо отметить, что данный подход позволяет определить не абсолютное значение искомой величины, а возможное аналоговое значение постоянной Гамакера (A_m). Получить в качестве количественного критерия, характеризующего, например, изменение природы анализируемого вещества и приближение значений A_m к эталонной величине (определенной для модельного объекта), даст возможность оценить корректность предлагаемой схемы превращений. Поэтому целью данной работы является экспериментальное определение динамики изменения аналоговой величины постоянной Гамакера порошков сапонитсодержащего материала, полученных при разном времени механического помола, и определение степени приближения данного параметра к значениям, характерным для эталонного порошка серпентина.

В ранее проведенных исследованиях [17] была показана возможность экспериментального определения величины аналога постоянной Гамакера (A_m), характеризующей энергию дисперсионного взаимодействия поверхности твердого тела при его контакте с водно-этанольным (слабополярным) раствором (A_{m01}). Здесь индексом «0» обозначена жидкая фаза, контактирующая с поверхностью анализируемого твердого тела – «1». Для определения A_{m01} использована функциональная зависимость:

$$\cos\theta_0 = 1 + \frac{A_{m01}}{12\pi\sigma_{ж}h^2}, \quad (1)$$

где $h=0,24$ нм – ван-дер-ваальсовое расстояние.

Величина A_{m01} функционально связана со свойствами раствора (A_{00}) и непосредственно твердой фазы (A_{11}), которую можно рассчитать по уравнению:

$$A_{11} = A_{m01} + 2\sqrt{A_{m01}A_{00}} + A_{00}, \quad (2)$$

Проведенные расчеты [18] показали, что в случае использования в качестве рабочих жидкостей с известным значением поверхностного натяжения водно-этанольных растворов в диапазоне концентраций спирта от 96 до 60 об. % величина A_{00} остается практически постоянной, равной $A_{00}=3,92 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовался сапонитсодержащий материал, выделенный путем электролитной коагуляции после предварительного отстаивания и удаления грубодисперсной песчаной

Таблица 1
Table 1

Поверхностное натяжение водноспиртовых растворов при разной объемной концентрации спирта ($C_{сп}$)
Surface tension of water-alcohol solutions at different volume concentrations of alcohol (C_{al})

$C_{сп}, \%$	60	70	80	90	96
$\sigma_{ж}, \text{мДж/м}^2$	33,03	31,81	31,23	30,83	30,59

Таблица 2
Table 2

Значения $\cos\theta$ для исследуемых образцов
Cos θ values for test samples

Образец*	Cos θ при концентрации спирта $C_{сп}$				
	60%	70%	80%	90%	96%
ССМ ₀	15,1	12,8	11,7	11,2	10,4
ССМ ₂₀	15,6	13,8	12,3	11,7	10,8
ССМ ₆₀	15	12,3	11	9,7	8
Серпентин	15,2	11,7	9,2	7,8	6,3

Примечание. * Подстрочный индекс обозначает время помола.

фракции. Используемый прием позволяет выделить из суспензии твердую фазу с массовым содержанием сапонита до 80% [1]. Полученный сапонитосодержащий материал (ССМ) высушивали и доводили до постоянной массы при температуре 105°C, после чего проводили сухой механический помол ССМ в планетарной шаровой мельнице Retsch PM10 в течение 20 и 60 мин. Данные временные интервалы были выбраны на основании результатов исследований, изложенных в работе [13], которые показали, что максимальный выход серпентина при механическом помоле сапонита практически достигается после 60 мин обработки. Временной интервал, равный 20 мин помола, выбран в качестве промежуточной точки модификации (для оценки ее динамики). В ка-

честве эталона сравнения использован порошок серпентина, предоставленный фирмой-изготовителем «Карбонфокс» (содержание серпентина 99,5%; средний размер частиц 1,5 мкм).

Для определения угла смачивания исследуемых фракций были изготовлены образцы-запрессовки из исследуемых порошков диаметром 20 мм на гидравлическом прессе ПЛГ-20 при фиксированном значении давления, равном 8 кПа; время выдержки при избыточном давлении составило 3 мин. Угол смачивания (θ) опытных образцов фиксировали при максимальном значении диаметра основания капли, нанесенной на поверхность анализируемого объекта рабочего раствора [19]. Данные эксперименты выполняли на гониометре DSA-20E. Определение краевого угла (температура 20±2°C) сопровождалось тремя параллельными измерениями; для регистрации краевого угла в каждом отдельном измерении каплю рабочей жидкости (с известным значением поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$) наносили на разные участки поверхности образца. В качестве рабочих жидкостей использовались водные растворы этанола с концентрацией спирта (спирт-гидролизный) от 96 до 60 об. %. Определение значений поверхностного натяжения используемых рабочих жидкостей при температуре опыта проводили также на гониометре DSA-20E методом «висячей капли».

Для определения аналоговой величины постоянной Гамакера (A_{m01}) поверхности запрессованных образцов использовался метод Г.А. Зисмана с построением для каждого анализируемого образца функциональных зависимостей вида:

$$\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{ж}) \quad (3)$$

с последующим расчетом $A_{m01} = a \cdot 12\pi h^2$, где a – тангенс угла наклона функциональной зависимости (3). Вычисление A_{11} проводили по уравнению (2).

Результаты и обсуждения

В табл. 1 представлены экспериментально определенные значения поверхностного натяжения водно-

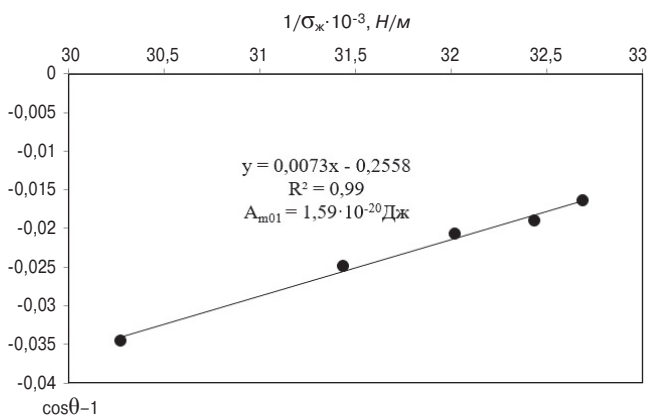


Рис. 1. Функциональная зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{ж})$ для запрессованного образца ССМ без предварительного механического помола
Fig. 1. Functional dependence $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{иг})$ for a pressed SCM sample without preliminary mechanical grinding

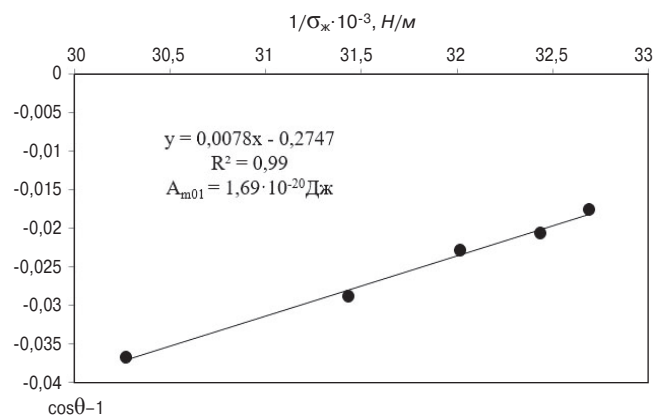


Рис. 2. Функциональная зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{ж})$ для запрессованного образца ССМ₂₀
Fig. 2. Functional dependence $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{иг})$ for a pressed SCM₂₀ sample

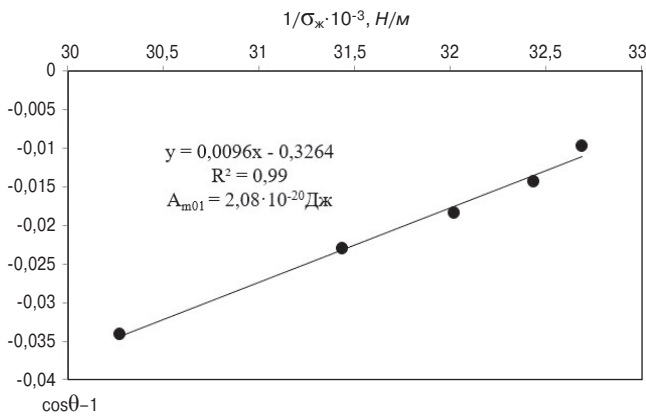


Рис. 3. Функциональная зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{ж})$ для запрессованного образца ССМ₆₀

Fig. 3. Functional dependence $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{lig})$ for a pressed SCM₆₀ sample

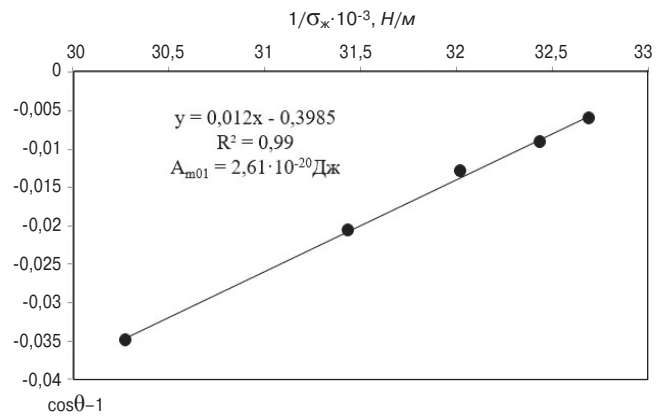


Рис. 4. Функциональная зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{ж})$ для запрессованного образца серпентина

Fig. 4. Functional dependence $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{lig})$ for a pressed serpentine sample

Таблица 3
Table 3

Рассчитанные характеристики для образцов ССМ и серпентина
Calculated characteristics for SCM and serpentine samples

Образец	<i>a</i>	$A_{m01} \cdot 10^{20}$, Дж	$A_{11} \cdot 10^{20}$, Дж	$\delta = \frac{A_{11серпн} - A_{11}}{A_{11серпн}}$, %
Серпентин	0,012	2,61	12,92	—
ССМ ₀	0,0073	1,59	10,49	19
ССМ ₂₀	0,0078	1,69	10,77	17
ССМ ₆₀	0,0096	2,08	11,72	9

Таблица 4
Table 4

Эмпирические уравнения функциональной зависимости (3) и значения мнимого краевого угла (θ^*)
Empirical equations of the functional dependence (3) and values of the imaginary contact angle (θ^*)

Образец	Уравнение	$\cos\theta^*$	θ^* , °
ССМ ₀	$\cos\theta - 1 = \frac{0,0073}{\sigma_{ж}} - 0,2558$	0,7442	42
ССМ ₂₀	$\cos\theta - 1 = \frac{0,0078}{\sigma_{ж}} - 0,2747$	0,7253	43
ССМ ₆₀	$\cos\theta - 1 = \frac{0,0096}{\sigma_{ж}} - 0,3264$	0,6736	49
Серпентин	$\cos\theta - 1 = \frac{0,012}{\sigma_{ж}} - 0,3985$	0,6015	53

спиртовых растворов, используемых в качестве рабочих жидкостей.

В табл. 2 приведены значения $\cos\theta$, рассчитанные по средним значениям краевых углов при контакте рабочих жидкостей с поверхностью опытных образцов. Следует отметить, что отклонения абсолютных величин углов смачивания от среднего значения при проведении параллельных измерений не превышали 2°. Кроме того, установлено, что поверхности опытных образцов хорошо смачиваются рабочими жидкостями, краевой угол для всех серий экспериментов изменяется в диапазоне 6–16°, причем отмечена тенденция к его уменьшению при увеличении концентрации спирта рабочей жидкости.

На рис. 1–4 приведены функциональные зависимости (3) для всех серий эксперимента, которые описываются уравнениями прямых с высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации (R^2).

В табл. 3 приведены рассчитанные значения тангенса угла наклона полученных зависимостей (*a*), аналоговых постоянных Гамакера (A_{m01} и A_{11}) и относительное отклонение (δ , %) полученных значений A_{11} для образцов ССМ разного вре-

мени помола от аналогичного значения для образца серпентина.

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что для исследуемых порошковых систем ССМ при увеличении времени механического помола происходит возрастание энергии дисперсионного взаимодействия частиц с приближением при 60-минутном механическом диспергировании к значению, характерному для порошка серпентина. Таким образом, принимая во внимание, что через постоянную Гамакера выражается только дисперсионная составляющая поверхностной энергии, учитывающая природу взаимодействующих частиц, можно утверждать, что при механическом помоле исследуемых порошков происходят трансформационные превращения трехслойной кристаллической решетки сапонита в двухслойную, характерную для серпентина.

Отличие полученных на основе эмпирических данных математических выражений (табл. 4) от функциональной зависимости (3) заключается в наличии свободного члена уравнения.

Физический смысл данного коэффициента можно установить исходя из допущения, связанного с

состоянием дисперсной системы, при котором угловой коэффициент a линейных уравнений (табл. 4)

равен нулю. Учитывая, что $a = \frac{A_{m01}}{24\pi h^2}$, такой виртуальный случай возможен только при $A_{m01}=0$, т. е. в отсутствие дисперсионного взаимодействия между частицами, разделенными прослойкой жидкости (рабочим раствором), когда, например, порошковый образец полностью разуконплектован. Тогда значения косинуса мнимого краевого угла (θ^*) будут характеризовать химическую и структурную (поверхностную) природу отдельно взятой частицы. Приведенные рассчитанные значения θ^* для исследуемых порошковых систем (табл. 4) показывают, что дисперсные системы ССМ₆₀ и серпентина характеризуются мнимыми краевыми углами, близкими по величине (49 и 53° соответственно) и значительно отличающимися от данных параметров для остальных анализируемых порошков.

Список литературы

1. Малыгина М.А., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздук Т.А., Фролова М.А. Аспекты электролитной коагуляции сапонитсодержащей суспензии оборотной воды горноперерабатывающих предприятий // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 11. С. 27–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-27-33>
2. Шпилевая (Вержак) Д.В., Гаранин К.В. Алмазные месторождения Архангельской области и экологические проблемы их освоения // *Вестник Московского университета. Серия 4, Геология*. 2005. № 6. С. 18–26.
3. Morozova M.V., Akulova M.V., Frolova M.A. Energy characteristics of sands of deposits in the Ivanovo region. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012045
4. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Применение сапонитсодержащего материала для получения морозостойких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 1. С. 28–31.
5. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Махова Т.А. Использование сапонитсодержащих отходов в качестве компонента сухой строительной смеси для мелкозернистых бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 4. С. 137–141.
6. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Effect of thermal modification of saponite-containing material on energy properties of its surface // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. 077053. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077056

Выводы

Проведенные исследования позволили рассчитать аналоговую постоянную Гамакера исследуемых минеральных дисперсий. Установлено, что при увеличении продолжительности помола сапонитсодержащего материала значения постоянной Гамакера возрастают. Учитывая, что через постоянную Гамакера выражается только дисперсионная составляющая поверхностной энергии, увеличение данного показателя приводит к возрастанию энергии ван-дер-ваальсового взаимодействия между частицами порошков. Кроме того, приближение значений данной постоянной при механическом помоле сапонита к величине, характерной для серпентина, позволяет сделать вывод, что при механическом помоле исследуемых порошков происходят трансформационные превращения трехслойной кристаллической решетки сапонита в двухслойную, характерную для серпентина.

References

1. Malygina M.A., Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Drozdyuk T.A., Frolova M.A. Electrolyte coagulation of saponite bearing water suspension for reuse by mining enterprises. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. Vol. 26. No. 11, pp. 27–33. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-27-33>
2. Shpilevaya (Verzhak), D.V., Garanin K.V. Diamond deposits of the Arkhangelsk region and environmental problems of their development. *Vestnik of Moscow University. Series 4, Geology*. 2005. No. 6, pp. 18–26. (In Russian).
3. Morozova M.V., Akulova M.V., Frolova M.A. Energy characteristics of sands of deposits in the Ivanovo region. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012045
4. Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Application of saponite-containing material for production of frost-resistant concretes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 28–31. (In Russian).
5. Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Makhova T.A. The use of saponite-containing waste as a component of a dry mortar for fine-grained concrete with improved performance. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 4, pp. 137–141. (In Russian).
6. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Effect of thermal modification of saponite-containing material on energy properties of its surface. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. 077053. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077056
7. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Inorganic binder for mineral wool ther-

7. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С., Фролова М.А. Неорганическое связующее для минераловатной теплоизоляции // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 86–88.
8. Зырянова В.Н., Бердов Г.И. Магнезиальные вяжущие вещества из отходов брусита // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 61–64.
9. Аверина Г.Ф., Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я. Выявление возможности использования магнезиальных отходов ГОК для производства вяжущих // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 86–49.
10. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Королев Е.В. Высокотемпературная модификация сапонитсодержащего материала // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35>
11. Arthur T. Colloid and surface properties of clays and related minerals. Hubbard. Santa Barbara science project. Santa Barbara. California. 2002. 296 p.
12. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: Гос. изд-во геол. литературы, 1951. 543 с.
13. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Малыгина М.А., Дроздюк Т.А., Фролова М.А. Структурная модификация высокодисперсных порошков вскрышных пород сапонитсодержащей бентонитовой глины // *Физика и химия обработки материалов*. 2023. № 1. С. 56–63.
14. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // *Успехи физических наук*. 1958. Т. 64. № 3. С. 493–528.
15. Бойнович Л.Б. Дальнодействующие поверхностные силы и их роль в развитии нанотехнологии // *Успехи химии*. 2007. Т. 76. № 5. С. 510–528.
16. Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Михайлова О.Н., Махова Т.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 53–55.
17. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздюк Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах // *Физика и химия обработки материалов*. 2021. № 3. С. 40–48.
18. Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Drozdyuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. Possible approach to estimating the dispersion interaction in powder systems // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 3, pp. 793–799. DOI: 10.30791/0015-3214-2021-3-40-48
19. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the contact angles of powders by the sessile drop method // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. Vol. 12. No. 3, pp. 794–798.
- mal insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 86–88. (In Russian).
8. Zyryanova V.N., Berdov G.I. Magnesian binders from brucite waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 4, pp. 61–64. (In Russian).
9. Averina G.F., Chernykh T.N., Orlov A.A., Kramar L.Ya. Identification of the possibility of using magnesia waste from the mining and processing complex for the production of binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 86–49. (In Russian).
10. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V. High-temperature modification of saponite-containing material. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 11, pp. 30–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35>
11. Arthur T. Colloid and surface properties of clays and related minerals. Hubbard. Santa Barbara science project. Santa Barbara. California. 2002. 296 p.
12. Betekhtin A.G. Kurs mineralogii [Mineralogy course]. Moscow: State publishing house of geological literature. 1951. 543 p.
13. Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Malygina M.A., Drozdyuk T.A., Frolova M.A. Structural modification of fine powders of overburden saponitecontaining bentonite clay. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2023. No. 1, pp. 56–63. (In Russian).
14. Deryagin B.V., Abrikosova I.I., Lifshits E.M. Molecular attraction of condensed bodies. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1958. Vol. 64. No. 3, pp. 493–528. (In Russian).
15. Boinovich L.B. Long-range surface forces and their role in the development of nanotechnology. *Uspekhi khimii*. 2007. Vol. 76. No. 5, pp. 510–528. (In Russian).
16. Veshnyakova L.A., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Mikhailova O.N., Makhova T.A. Assessment of the energy state of raw materials for the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 10, pp. 53–55. (In Russian).
17. Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Drozdyuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. Possible approach to estimating the dispersion interaction in powder systems. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2021. No. 3, pp. 40–48. (In Russian). DOI: 10.30791/0015-3214-2021-3-40-48
18. Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Drozdyuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. Possible approach to estimating the dispersion interaction in powder systems. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 3, pp. 793–799. DOI: 10.30791/0015-3214-2021-3-40-48
19. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the contact angles of powders by the sessile drop method. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. Vol. 12. No. 3, pp. 794–798.

Н.И. КОЖУХОВА^{1,2}, канд. техн. наук (kozuhovanata@yandex.ru)

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

² Московский политехнический университет (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

Особенности модификации геополимера на основе перлита как экологически эффективного вяжущего

Увеличение спектра сырьевых материалов для синтеза геополимеров дает возможность расширения потенциальных областей их практического применения за счет доступности сырья, а также за счет выявления новых свойств этой группы бесцементных экологически эффективных или «зеленых» материалов. В работе изучено влияние двух факторов – типа минерального модифицирующего компонента и способа использования щелочного активирующего агента – на некоторые характеристики перлитового геополимерного вяжущего, такие как водопотребность (В/Т соотношение), средняя плотность и предел прочности при сжатии. В качестве минеральных модифицирующих компонентов были использованы: портландцемент, каолинит, метакраолин и цитрогипс. Установлено, что 24-часовая выдержка щелочного раствора NaOH снижает водопотребность геополимерной вяжущей системы до 46% по сравнению со свежеприготовленным раствором щелочи. Наиболее высокую водопотребность демонстрируют составы с использованием минеральных модификаторов, таких как портландцемент, каолинит и метакраолин. Выявлено, что тип минерального модификатора и способ введения щелочного активатора не оказывают ощутимого влияния на среднюю плотность геополимерного каркаса. Экспериментальные исследования показали, что введение таких модификаторов, как портландцемент и каолинит, в перлитовую геополимерную матрицу приводит к ее упрочнению от 0,32 до 2 раз.

Ключевые слова: перлит, минеральный модификатор, способ применения щелочного активатора, модифицированное геополимер перлитовое вяжущее, водопотребность, средняя плотность, предел прочности при сжатии.

Исследования выполнены в рамках реализации нацпроекта «Наука и университеты», научная тема «Создание лаборатории качества среды обитания человека и энергоэффективности городского хозяйства (FZRR-2022-0007)», рег. номер 1022072100016-6-2.1.3. Работа выполнена на оборудовании Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Кожухова Н.И. Особенности модификации геополимера на основе перлита как экологически эффективного вяжущего // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-60-66>

N.I. KOZHUKHOVA^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (kozuhovanata@yandex.ru)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostukov Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Street, Moscow, Russian Federation)

Modification Specifics of Perlite-Based Geopolymer as Eco-Friendly Cement

The increase in the range of raw materials for geopolymer synthesis makes it possible to expand the potential areas of their practical application due to the availability of raw materials, as well as by identifying new properties of this group of free-of-cement eco-friendly or “green” materials. The effect of the following two factors: the type of mineral modifying component and the method of using an alkaline activating agent on some characteristics of a perlite geopolymer binder, such as water demand (W/T ratio), average density, and compressive strength, was studied in the article. The following materials were used as mineral modifying components: Portland cement, kaolinite, metakaolin, and citrogypsum. It has been found that a 24-hour aged alkaline solution of NaOH significantly reduces the water demand of the geopolymer by up to 46% compared to a freshly prepared alkali solution. The highest water demand is typical for mixes using mineral modifiers such as Portland cement, kaolinite, and metakaolin. It was found that the type of mineral modifier and the method of using an alkaline activating agent do not have a significant effect on the average strength of the geopolymer framework. Experimental studies have shown that the introduction of such modifiers as Portland cement and kaolinite into the perlite geopolymer matrix leads to its strengthening by 0.32–2 times.

Keywords: perlite, mineral modifier, method of application of alkaline activating agent, modified perlite geopolymer, water demand, average density, compressive strength.

The research was carried out as part of the implementation of the national project “Science and Universities”, scientific topic “Creation of a laboratory for the quality of the human environment and energy efficiency of urban economy (FZRR-2022-0007)”, reg. number 1022072100016-6-2.1.3. The work was performed on the equipment of the Center for High Technologies of the Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov.

For citation: Kozhukhova N.I. Modification specifics of perlite-based geopolymer as eco-friendly cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 60–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-60-66>

Использование экологически эффективных или «зеленых» технологий в производственном процессе с каждым годом набирает популярность во всем мире. Эта тенденция вызвана постоянным увеличением уровня загрязнения окружающей среды благодаря постоянно растущим выбросам многотоннажных промышленных и бытовых отходов в виде твердофазных компонентов [1–5], жидкостей [6] и газов [7–9]. Причиной данной ситуации, как прави-

ло, является использование морально устаревших неэффективных производственных технологий, которые не ориентированы на экологичность.

Наиболее распространенным примером неэкологичного технологического процесса в строительной отрасли является производство портландцемента.

Кроме того, высокоэнергоемкие процессы, которые сопровождаются значительными выбросами тепловой энергии в окружающую среду, также при-

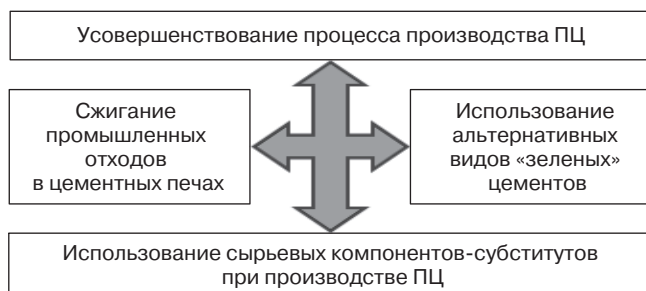


Рис. 1. Способы снижения негативного воздействия цементного производства на окружающую среду

Fig. 1. Ways to reduce the negative impact of cement production on the environment

нято считать низкоэффективными и неэкологичными.

Как правило, при использовании перспективных современных технологий, в частности, при производстве строительных материалов и изделий, активно используются автоматизированные процессы, позволяющие оптимизировать составы композитов с экономической точки зрения [10], минимизировать негативное экологическое воздействие на окружающую среду с учетом обеспечения высококачественной конечной продукции, удовлетворяющей современным требованиям.

Существует несколько наиболее распространенных способов снижения негативного воздействия цементного производства на окружающую среду, представленных на рис. 1.

Экологические нормы обеспечивают внешние стимулы для промышленности, чтобы скорректировать свои методы производства с учетом экологических ограничений, которые государства налагают на промышленные предприятия [11].

Кроме того, немаловажной проблемой, с которой сталкиваются предприятия цементной отрасли, является непрерывно растущая стоимость электроэнергии – неотъемлемой части производственного процесса (следует отметить, что производство портландцемента является энергоемким процессом). Это, в первую очередь, связано с тенденцией непрерывного снижения запасов природных энергоносителей, которые априори относятся к невозобновляемым или лишь частично возобновляемым источникам энергии. Перечисленные факторы оказывают значительное влияние на себестоимость портландцемента, а также и на его конечную (рыночную) стоимость. Кроме того, нежелательным дополнением к и без того высокой стоимости цемента являются так называемые «зеленые» налоги, которые представляют собой дополнительные расходы в случае, если не соблюдаются условия по ограничению выбросов предприятием или выбросы вовсе не ограничиваются. Эти издержки в итоге ложатся на плечи потребителя и, как правило, проявляются в конечной стоимости продукта. Такая ценовая политика может привести к удвоению цен на цемент к 2030 г. [12].

Термин «зеленые» технологии в мировой научной литературе принято понимать как технологии, кото-

рые включают в себя химические и технологические процессы, не оказывающие негативного экологического давления на окружающую среду [13, 14].

Однако к «зеленым» также следует отнести технологии, подразумевающие утилизацию промышленных и или бытовых отходов [15–18].

Компания Calera Corporation предложила к использованию процесс синтеза вяжущего вещества, который имитирует синтез так называемого морского цемента. По компонентному составу он аналогичен цементирующему веществу, которое содержится в коралловых рифах. Синтез заключается в извлечении кальция и магния из морской воды с последующим их взаимодействием с углекислым газом, который извлекается путем фильтрации из сточных газов. В результате формируются карбонатные цементированные образования белого цвета, которые по свойствам соответствуют высококачественному цементу. Такой цемент характеризуется высокой воздухопроницаемостью и более высокой прочностью по сравнению с традиционным портландцементом [19].

К одному из наиболее ярких представителей строительных материалов, которые удовлетворяют сразу обоим критериям – утилизации отходов и отсутствию загрязняющих выбросов в процессе производства, можно отнести щелочеактивированные материалы, и, в частности, геополимеры.

Однако среди ряда преимуществ использования техногенного сырья при производстве не только щелочеактивированных, но и других видов строительных материалов нельзя не отметить один существенный их недостаток – непостоянство компонентного (химического и фазово-минерального) состава. Этот факт значительно ограничивает области применения промышленных отходов. Кроме того, проводимые исследования с использованием техногенного сырья из-за особенностей их получения носят преимущественно локальный характер.

Учитывая вышеизложенное, использование природного сырья имеет значительное преимущество по сравнению с техногенным и подтверждается многочисленными исследованиями, направленными на получение вяжущих и материалов строительного назначения [20, 21]. Например, такой природный материал, как перлит, получил широкое распространение в строительной отрасли в качестве заполнителя при производстве легких бетонов, изоляционных материалов и т. д. Из-за его аморфизованной структуры и химического состава (70–75% SiO_2 и 12–18% Al_2O_3) тонкоизмельченный перлит обладает пуццолановыми свойствами, как показано в недавних исследованиях [22]. Эрдем и др. [23], используя в своих исследованиях молотый перлит для производства смешанных цементов и строительных растворов, сделали вывод, что измельчение перлита представляет собой менее энергоемкий процесс, чем измельчение портландцементного клинкера.

В исследовании [24] изучена реакционная способность перлита в составе геополимера при использовании разных типов щелочных активаторов:

гидроксида натрия и силиката натрия в виде водных астворов. Исследования проводились с использованием разных условий твердения.

Авторами было выявлено, что геополимерные пасты, активированные силикатом натрия, медленно достигают требуемой прочности при комнатной температуре; геополимерные пасты, активированные гидроксидом натрия, при комнатной температуре не твердеют вовсе, независимо от концентрации щелочного агента. При этом температурная обработка при 100°C в сушильном шкафу (термическая сушка) оказывает положительный эффект на твердение паст с использованием обоих щелочных активаторов.

В работе [23] предложено использование смешанного цемента, где в качестве основных реакционных компонентов использовался традиционный портландцемент и перлит в количестве до 30% от общей доли вяжущего. Установлено, что полученные таким образом смешанные цементы обеспечивают медленный набор прочности и демонстрируют низкие прочностные показатели, особенно в раннем возрасте, по сравнению с чистым портландцементом. Однако за счет протекания пуццолановых реакций прочность достигает сопоставимого значения с чистым портландцементом на более поздних сроках твердения.

Целью данного исследования является изучение влияния компонентного состава и технологических параметров приготовления геополимерного вяжущего на основе перлита на некоторые его физико-механические характеристики.

Влияние компонентного состава изучалось с помощью введения различных минеральных веществ в качестве модифицирующих добавок в состав вяжущего.

В качестве второго значимого технологического параметра был выбран способ использования щелочного активирующего агента при приготовлении геополимерной пасты.

Методы испытаний

Химический состав перлита был определен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Для этого применялась рентгеновская рабочая станция WorkStation ARL 9900 с использованием излучения Со-анода.

Удельная поверхность порошкообразных сырьевых материалов определялась с использованием анализатора удельной поверхности и пористости СОРБИ-М четырехточечным методом БЭТ.

Испытания на оценку предела прочности при сжатии образцов геополимерного вяжущего осуществлялись на экспериментальных образцах-кубах

размером 70×70×70 мм с использованием стандартной методики, описанной в ГОСТ 10180–90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Определение удельной поверхности порошкообразных сырьевых материалов проводилось на многофункциональном приборе ПСХ-12 (SP, Россия).

Оценка показателей средней плотности ρ (кг/м³) для образцов-кубов осуществлялось стандартным расчетным методом, отраженным в ГОСТ 12730.1–78 «Бетоны. Методы определения плотности» с использованием формулы (1):

$$\rho = \frac{m}{V}, \tag{1}$$

где m – масса исследуемого образца-куба, кг; V – объем исследуемого образца-куба, м³.

С учетом особенностей структурообразования геополимерных вяжущих процесс отверждения экспериментальных образцов производился в условиях термической сушки, которая производилась в лабораторном сушильном шкафу (FD-53, производитель BINDER, Германия) с рабочим температурным диапазоном от 10 до 300°C.

Определение прочностных характеристик экспериментальных образцов осуществлялось на малогабаритном гидравлическом прессе ПГМ-100 (ООО «СКБ Стройприбор»).

Материалы

Для активации твердофазной алюмосиликатной составляющей в качестве активирующего агента в работе использовался натр едкий NaOH марки ЧДА (массовая доля гидроксида натрия не менее 98%), который соответствует требованиям нормативного документа ГОСТ 2263–79 «Натр едкий. Технические условия».

В качестве основного алюмосиликатного сырья использовался перлит Мухор-Талинского месторождения, химический состав которого приведен в табл. 1.

Перлит, применяемый в качестве основного алюмосиликатного компонента, в исходном виде от производителя представлен в форме крупнокускового камня с размерами отдельных кусков в диапазоне 1–7 см. В связи с этим для проведения исследований перлитовый щебень был измельчен до тонкодисперсного состояния в два этапа:

– первый этап: дробление крупных кусков перлита на более мелкие с использованием щековой дробилки ШД 6, с объемом приемной емкости 2 л и производительной мощностью 200 кг/ч;

**Таблица 1
Table 1**

**Химический состав перлита
Chemical composition of perlite**

Оксидный состав, мас. %										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Σ	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	ППП
71,97	17,34	4,43	4,63	1,07	0,872	0,737	0,11	100,15	4,1	7,3

Таблица 2
Table 2

Некоторые физические параметры
используемых твердофазных компонентов
Some physical parameters of the used solid
phase components

Компонент	Параметр	
	Удельный вес, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г
Перлит	2,38	4820
ПЦ	3,05	3200
К	2,61	10910
МК	2,52	11700
ЦГ	2,36	3610

– второй этап: помол в шаровой мельнице в течение 2 ч. Удельная поверхность после помола составила 482 м²/кг.

Важно отметить, как установлено ранее в работе [23], перлиты измельчаются легче, чем клинкер портландцемента, что говорит об их лучшей размолоспособности. Этот факт позволяет говорить о возможности получения на основе перлитов энергоэффективных вяжущих и материалов на их основе, синтез которых обеспечивает меньшее потребление энергии для производства.

Согласно данным химического анализа (табл. 1) доля оксидов щелочных металлов Na₂O и K₂O в составе применяемого перлита составляет более 9%. С учетом того, что обязательным условием успешного протекания реакций геополимеризации является наличие едких щелочей, с позиции экономической целесообразности присутствие вышеуказанных оксидов в перлите является позитивным аспектом. Это связано с тем, что присутствие катионов щелочи (Na⁺ и K⁺) в структуре алюмосиликатного сырья дает возможность сократить долю щелочного активирующего агента, который необходимо ввести дополнительно для обеспечения эффективного геополимерного синтеза.

В качестве модифицирующих добавок для перлитовой геополимерной системы использовались следующие минеральные компоненты: портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н (ЗАО «Белгородский цемент»), цитрогипс (ЦГ) – побочный продукт, получаемый в процессе синтеза лимонной кислоты; природный каолинит (К) месторождения Кривой Рог; синтетический метакаолин (МК), полученный в результате обжига каолинита в лабораторной муфельной печи при температуре 750°C в течение 2 ч.

Некоторые физические свойства перлита и используемых модифицирующих минеральных добавок представлены в табл. 2.

Результаты и обсуждения

Для проведения испытаний были заформованы две серии образцов-кубов размером 70×70×70 мм с использованием модифицирующих компонентов: портландцемент, каолинит, метакаолин, цитрогипс. Первая серия образцов была синтезирована с использованием свежеприготовленного водного раствора NaOH (составы 1–5).

Вторая серия образцов была синтезирована с использованием водного раствора NaOH с 24-часовой выдержкой после приготовления (составы 1-24–5-24).

Компонентный состав экспериментальных геополимерных паст и их обозначение представлены в табл. 3.

При подготовке экспериментальных составов было выявлено, что тип минерального модификатора и способ использования щелочного активирующего агента в значительной степени влияют на водопотребность (В/Т отношение) перлитовой геополимерной пасты (рис. 2).

Таблица 3
Table 3

Экспериментальные составы перлитовых геополимеров
Experimental mixes of perlite-based geopolymers

Обозначение состава	Компонентный состав, %						
	Перлит	Вода	NaOH	Модифицирующий агент			
				ПЦ	К	МК	ЦГ
1*	73,3	20,6	6,1	–	–	–	–
1-24**	69,2	23,6	7,2	–	–	–	–
2	39	28,3	6,7	26	–	–	–
2-24	41,5	23,6	7,2	27,7	–	–	–
3	38,8	28,6	6,7	–	25,9	–	–
3-24	41,5	23,6	7,2	–	27,7	–	–
4	37,8	30,4	6,5	–	–	25,2	–
4-24	41,5	23,6	7,2	–	–	27,7	–
5	41,5	23,6	7,2	–	–	–	27,7
5-24	42,9	21,8	6,6	–	–	–	28,6

Примечания: * Составы перлитового геополимера, активированного свежеприготовленным водным раствором NaOH.
** Составы перлитового геополимера, активированного водным раствором NaOH с 24-часовой выдержкой после приготовления.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что использование свежеприготовленного водного раствора NaOH в перлитовой геополимерной системе совместно с минеральным модификатором приводит к незначительному увеличению водопотребности всех модифицированных составов (увеличение $\approx 53\text{--}70\%$), по сравнению с контрольным (немодифицированным) составом 1. При этом в серии составов с разными минеральными модификаторами, с использованием водного раствора NaOH с 24-часовой выдержкой (составы 1-24–5-24) водопотребность остается неизменной.

Однако при сравнении с составами с разными минеральными компонентами, полученными при использовании свежеприготовленного водного раствора NaOH (составы 2–5), 24-часовая выдержка водного раствора NaOH приводит к значительному снижению водопотребности. Так, водопотребность увеличивается от 8% для состава 5-24 (с содержанием цитрогипса) до 46% для состава 4-24 (с содержанием метакаолина).

Таким образом, при использовании свежеприготовленного раствора NaOH вид минерального модификатора сильно влияет на водопотребность в сторону больших значений, кроме контрольного состава 1.

Оценка характеристик прочности при сжатии и средней плотности осуществлялась для исследуемых образцов-кубов после 9 сут с момента их формования.

Образцы-кубы были заформованы в металлические стандартные формы размером $70 \times 70 \times 70$ мм и подвержены термической обработке по следующему температурно-влажностному режиму: предварительная выдержка свежесформованных образцов в условиях относительной влажности – 34% и температуре $23 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 24 ч → помещение в сушильный шкаф с последующим нагревом до температуры 70°C в течение 2 ч → термическая сушка при 70°C в течение 24 ч → последующее остывание в сушильном шкафу до естественной лабораторной температуры ($23 \pm 5^\circ\text{C}$) → расформовка и последующая консолидация образцов в естественных лабораторных условиях (относительная влажность 34%, температура $23 \pm 5^\circ\text{C}$) до момента их испытания.

Результаты проведенных испытаний приведены на рис. 3 и 4.

Зависимость, представленная на рис. 3, показывает, что способ использования щелочного активатора оказывает минимальное влияние на значения средней плотности для всех составов и варьируется в пределах 10%. При этом влияние типа минерального модификатора более заметно. Введение портландцемента и каолина (составы 2, 3, 2-24 и 3-24) в состав геополимерного перлитового вяжущего приводит к увеличению средней плотности до 20–25%. Для составов 4, 5, 4-24 и 5-24 средняя плотность варьируется в пределах 5%.

Что касается показателей прочности при сжатии, то введение портландцемента и каолина (составы 2, 3, 2-24 и 3-24) приводит к упрочнению каркаса от

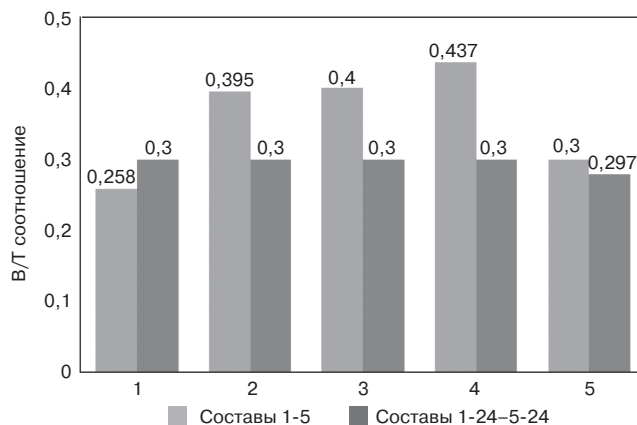


Рис. 2. Влияние типа модифицирующего агента и способа использования щелочного активатора на водопотребность (В/Т отношение) перлитовой геополимерной пасты

Fig. 2. Effect of modifying agent type and method of using alkaline activator on water demand (W/S ratio) of perlite-based geopolymer paste

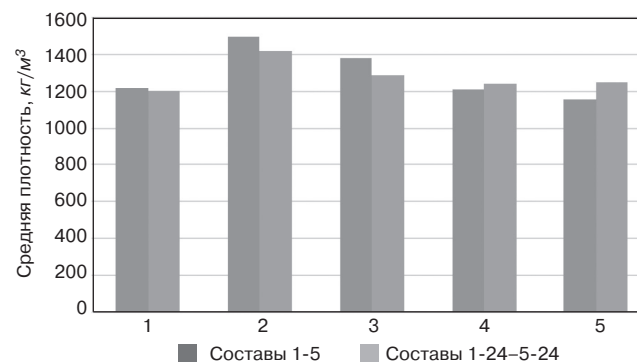


Рис. 3. Влияние типа модифицирующего агента и способа использования щелочного активатора на среднюю плотность перлитовой геополимерной пасты

Fig. 3. The effect of the type of modifying agent and the method of using an alkaline activator on the average density of a perlite-based geopolymer paste

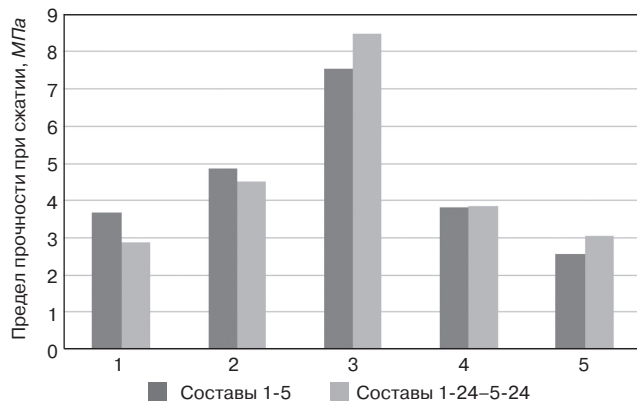


Рис. 4. Влияние типа модифицирующего агента и способа использования щелочного активатора на прочность при сжатии перлитовой геополимерной пасты

Fig. 4. Effect of type of modifying agent and method of using alkaline activator on compressive strength of perlite-based geopolymer paste

0,32 до 2 раз по сравнению с контрольными аналогами (составы 1 и 1-24).

Добавление цитрогипса в состав вяжущего на основе свежеприготовленного щелочного раствора (состав 5) приводит к снижению прочности каркаса на 30%. А при использовании щелочного раствора с 24-часовой выдержкой для аналогичного состава

(состав 5-24), наоборот, способствует повышению компрессионной прочности на 6%.

Также 24-часовая выдержка щелочного раствора NaOH повлияла на прочностные свойства следующих составов геополимерного вяжущего: снижение прочности при сжатии на 22% – для состава 1-24; повышение прочности на 12 и 18% – для составов 3-24 и 5-24. Для состава с использованием портландцемента (состав 2-24) наблюдалось незначительное снижение предела прочности при сжатии – до 7%, а для состава, модифицированного метакаолином (состав 4-24), изменений в показателях прочности не отмечено.

Выводы

В рамках исследования изучено влияние двух параметров на некоторые характеристики геополимера на основе перлита: наличие и тип минерального модифицирующего компонента в составе вяжущего; способ использования щелочного агента для активации твердофазной субстанции.

Установлено, что 24-часовая выдержка щелочного раствора NaOH значительно снижает водопотребность вяжущей системы – до 46%. Наиболее высокую водопотребность демонстрируют составы с использованием минеральных модификаторов, таких как портландцемент, каолинит и метакаолин.

Тип минерального модификатора и способ использования щелочного активатора не оказывают ощутимого влияния на среднюю прочность геополимерного каркаса.

Введение портландцемента и каолинита в перлитовую геополимерную матрицу приводит к ее упрочнению от 0,32 до 2 раз.

Список литературы / References

1. Das O., Babu K., Shanmugam V., Sykam K., Tebyetekerwa M., Esmaeely Neisiany R., Försth M., Sas G., Gonzalez-Liberos J., Capezza A.J., Hedenqvist M.S., Berto F., Ramakrishna S. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 158. 112054. DOI: 10.1016/j.rser.2021.112054
2. Delzell E. Wood dust and formaldehyde. Lyon: IARC, 1995. 423 p. DOI: 10.1016/s0003-2670(96)90555-3
3. Das O., Neisiany R.E., Capezza A.J., Hedenqvist M.S., Försth M., Xu Q., et al. The need for fully bio-based facemasks to counter coronavirus outbreaks: a perspective. *Sci. Total Environ*. 2020. Vol. 736. 139611. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139611
4. Arumugaprabu V., Johnson R.D.J., Vigneshwaran S. Mechanical performance of nanocomposites and biomass-based composite materials and its applications: an overview. *Handbook of nanomaterials and nanocomposites for energy and environmental applications*. Cham: Springer International Publishing, Cham. 2020. pp. 1–14. DOI: 10.1007/978-3-030-11155-7_123-1
5. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
5. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhukhova N.I., Titenko A.A. Overview analysis of methods for obtaining binders from gypsum-containing industrial waste. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11, pp. 8–23. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
6. Wu Q., Laixing L., Shubo Ch., Tahir I., Xianbin X., Changqing D. Efficient strategy of utilizing alkaline liquid waste boosting biomass chemical looping gasification to produce hydrogen. *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 217. 106818. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106818
7. Sumit H. Dhawane, Eslam G. Al-Sakkari, Deepak Yadav Cost-effective viable solutions for existing technologies. *Hazardous Waste Management*. 2022, pp. 381–395. DOI: 10.1016/B978-0-12-824344-2.00033-1
8. Urase T., Okumura H., Panyosaranya S., Inamura A. Emission of volatile organic compounds from solid waste disposal sites and importance of heat management. *Waste Manag. Res*. 2008. Vol. 26. № 6. P. 534–538. DOI: 10.1177/0734242X07084321
9. Sano Y., Williams S. Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. *Geophys. Res. Lett*. 1996. Vol. 23, pp. 2749–2752. DOI: 10.1029/96GL02260
10. Fomina E.V., Kozhukhova N.I., Sverguzova S.V., Fomin A.E. Application of mathematical model methods for optimization tasks in construction materials technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015 (5). 052015. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052015
11. Bhardwaj M. The Advantages and disadvantages of green technology. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*. 2021, pp. 1957–1960. https://www.researchgate.net/publication/357269773_The_Advantages_and_Disadvantages_of_Green_Technology
12. Mohammed S. Imbabi, Collette Carrigan, Sean McKenna. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012. Vol. 1 (2), pp. 194–216 DOI: 10.1016/j.ijse.2013.05.001
13. Qamar Muhammad Zaid, Noor Mariya, Ali Wahid, Qamar Mohammad. Green technology and its implications worldwide. *Inquisitive Meridian*. 2021. Vol. 3. Iss. 10. https://www.researchgate.net/publication/350443477_Green_Technology_and_its_Implications_Worldwide
14. Zhang J., Ouyang Y., Ballesteros-Pérez P., Li H., Philbin S.P., Li Zh., Skitmore M. Understanding the impact of environmental regulations on green technology innovation efficiency in the construction industry. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 65. 102647. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102647
15. Kozhukhova N.I., Alfimova N.I., Kozhukhova M.I., Nikulin I.S., Glazkov R.A., Kolomytceva A.I.

- Supplementary mineral additive on physical and mechanical performance of granulated blast furnace slag-based alkali-activated binders. *Recycling*. 2023. Vol. 8 (1). No. 22. DOI: 10.3390/recycling8010022
16. Voropaev V., Alfimova N., Nikulin I., Nikulicheva T., Titenko A., Nikulichev V. Influence of gypsum-containing waste on ammonia binding in animal waste composting. *Agriculture*. 2021. Vol. 11. 1153. DOI: 10.3390/agriculture11111153
 17. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Nikulin I.S., Titenko A.A. Binders from gypsum-containing waste and products based on them. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945 (1). 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012057
 18. Трепалина Ю.Н., Кириллова Н.К. Керамический кирпич из сырья Якутии с добавлением тонкомолотого стеклобоя // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 138–143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465
 18. Trepalina Yu.N., Kirillova N.K. Ceramic brick from the raw materials of Yakutia with the addition of finely ground cullet. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 4, pp. 138–143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465
 19. Calera The Science. 2013. <https://designerlee.com/portfolio/websites/calera-site/beneficial-re-use-of-co2/science.html>
 20. Kozhukhova N.I., Fomina E.V., Zhernovsky I.V., Stroko-va V.V., Chizhov R.V. The utilization efficiency of natural aluminosilicates in composite binders. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 670–671, pp. 182–186. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.182
 21. Espinoza-Hijazin Gaston, Paul Álvaro, Lopez Mauricio. Concrete containing natural pozzolans: new challenges for internal curing. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24, pp. 981–988. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000421
 22. Yu L.H., Ou H., Lee L.L. Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, pp. 73–76. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00924-9
 23. Erdem T.K., Meral Ç, Tokyay M., Erdoğan T.Y. Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement and Concrete Composites*. 2007. 29 (1), pp. 13–21. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2006.07.018
 24. Erdogan S.T. Properties of ground perlite geopolymer mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol. 27 (7). 04014210. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001172

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА



Учебное пособие «Химическая технология керамики»

Авторы – Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С.,
Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С.

Освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Главное внимание уделено основным процессам технологии керамики и ее свойствам. Подробно изложены характеристика различных видов сырья, проблемы подготовки керамических масс различного вида и их формование различными методами, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурирование, декорирование, механическая обработка. Детально описаны свойства керамических изделий – механические, деформационные, теплофизические, электрофизические, в том числе при высоких температурах.



Книга «Керамические пигменты»

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.

**Заказать литературу можно через редакцию
по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: mail@rifsm.ru,
или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**

УДК 625.7

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-67-72>

Н.В. ХОХЛОВА¹, аспирант (Natalyahoh@bk.ru),
 Н.И. ШЕСТАКОВ¹, канд. техн. наук (SHestakovNI@mgsu.ru),
 С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosov-academic53@mail.ru);
 И.И. ТИТОВА², канд. техн. наук, руководитель центра коллективного пользования «Прогресс» (ititova_u@mail.ru),
 Н.В. СЯЧИНОВА², канд. техн. наук (c-h-v@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1)

Особенности изменения битума в процессе рекуперации

Потребности устойчивого развития формируют актуальный запрос на эффективную утилизацию строительных отходов. Вместе с тем, если вопросы применения минеральных материалов и металла исследованы достаточно подробно, то процессы переработки композиционных битумосодержащих отходов требуют дополнительного изучения. В представленной работе рассматриваются вопросы изменения состава и структуры битумов, извлеченных из рулонных кровельных материалов с применением различных органических растворителей. Среди растворителей рассматриваются: технический керосин, трихлорэтилен, хлороформ и тетра-хлорметан. Для изучения состава и структуры использовались методы сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии и синхронного термического анализа. По полученным результатам рассчитана энергия активации для различных составов извлеченных битумов. Установлено, что исходя из химического состава и данных ИК-спектроскопии наиболее близким образцом извлеченного битума к контрольному является извлеченный с применением трихлорэтилена. По результатам обработки ТГА и ДСК установлено, что из всех изученных составов наиболее термоустойчивый образец битума, извлеченный с применением трихлорэтиленом, менее устойчивый – извлеченный с применением керосина.

Ключевые слова: битум, рекуперация, растворители, кровельные материалы, отходы, энергия активации, структурные связи.

Для цитирования: Хохлова Н.В., Шестаков Н.И., Федосов С.В., Титова И.И., Сячинова Н.В. Особенности изменения битума в процессе рекуперации // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-67-72>

N.V. KHOKHLOVA¹, Postgraduate Student (Natalyahoh@bk.ru), N.I. SHESTAKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (SHestakovNI@mgsu.ru), S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Science (Engineering), Academician of RAACS (fedosov-academic53@mail.ru); I.I. TITOVA², Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Progress Collective Use Center (ititova_u@mail.ru), N.V. SYACHINOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (c-h-v@mail.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² East Siberian State University of Technology and Management (40B/1, Klyuchevskaya Street, Ulan-Ude, 670013, Russian Federation)

Features of Bitumen Changes in the Recovery Process

The needs of sustainable development form an urgent request for the effective disposal of construction waste, however, if the issues of the use of mineral materials and metal are studied in sufficient detail, then the processing of composite bitumen-containing waste requires additional study. The article deals with the issues of changing the composition and structure of bitumens extracted from rolled roofing materials using various organic solvents. Among the solvents considered are: technical kerosene, trichlorethylene, chloroform and carbon tetrachloride. The composition and structure were studied using scanning electron microscopy, IR spectroscopy, and simultaneous thermal analysis. Based on the results obtained, the activation energy was calculated for various compositions of the extracted bitumen. It has been established that according to the results of the chemical composition and IR spectroscopy, the closest composition of the extracted bitumen to the control sample is the bitumen extracted using trichlorethylene. According to the results of TGA and DSC processing, it was found that the most thermally stable bitumen sample extracted using trichlorethylene is the less stable bitumen extracted using kerosene.

Keywords: bitumen, recovery, solvents, waterproofing materials, wastes, activation energy, structural connections.

For citation: Khokhlova N.V., Shestakov N.I., Fedosov S.V., Titova I.I., Syachinova N.V. Features of bitumen changes in the recovery process. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-67-72>

Реализация национального проекта «Безопасные качественные дороги» требует большого количества качественных дорожно-строительных материалов, в том числе битумов. В 2021 г. обновили около 16,5 тыс. км автомобильных дорог различных категорий в 84 субъектах страны. Увеличение темпов строительства асфальтобетонных покрытий формирует актуальный запрос на применение органических вяжущих. Вместе с тем объемы производства битума в России также растут: в 2015 г. производство составляло 5 млн т, в 2021 г. около 8 млн т, а к 2024 г. эксперты прогнозируют в отрасли новый подъем до 9,1 млн т.

В последнее время активно ведутся работы по реновации и капитальному ремонту существующего жилого фонда. Согласно Стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ до 2035 г. объем таких работ с 2024 г. может быть увеличен вдвое.

При проведении реновации и капитального ремонта образуются различные типы отходов, в том числе и битумосодержащие. В основном такими отходами являются кровельные материалы, утратившие свои эксплуатационные свойства. Такие отходы могут содержать в своем составе более 80% органического вяжущего – битума [1]. Они представляют со-

бой потенциальный источник битума для его вторичного применения в строительстве.

Как известно, рулонные кровельные материалы состоят из основы и битумного вяжущего или ПБВ (полимерно-битумное вяжущее). Поэтому основным препятствием применения такого битума является сложность его отделения от основы (различные полимеры, бумага, фольга) [2].

Одним из способов извлечения битума для его повторного применения можно рассмотреть рекуперацию, т. е. отделение вяжущего от основы физическими, химическими, термическими воздействиями [3, 4].

В данной работе рассматривается методика извлечения битума из битумосодержащих отходов с применением различных органических растворителей, представленных в табл. 1.

В качестве объекта исследования рассматривался кровельный материал на картонной основе, полученный при демонтаже в Московской области после 15 лет эксплуатации. В качестве контрольного образца принят битум, полученный путем термического сплавления (при температуре 105°C) с исследуемого образца без воздействия органических растворителей. Метод рекуперации с применением органических растворителей включает следующие этапы: насыщение исследуемого материала органическим растворителем (в соотношении 1:10 по массе), дальнейшее извлечение картонной основы и отгонка растворителя на ротационном испарителе Heidolph на базе ООО «Автобан-Мостотрест-Сервис».

Для изучения характера влияния органических растворителей на состав и структуру извлеченного битума проводились исследования элементного химического состава, а также методы ИК-спектроскопии и синхронного термического анализа.

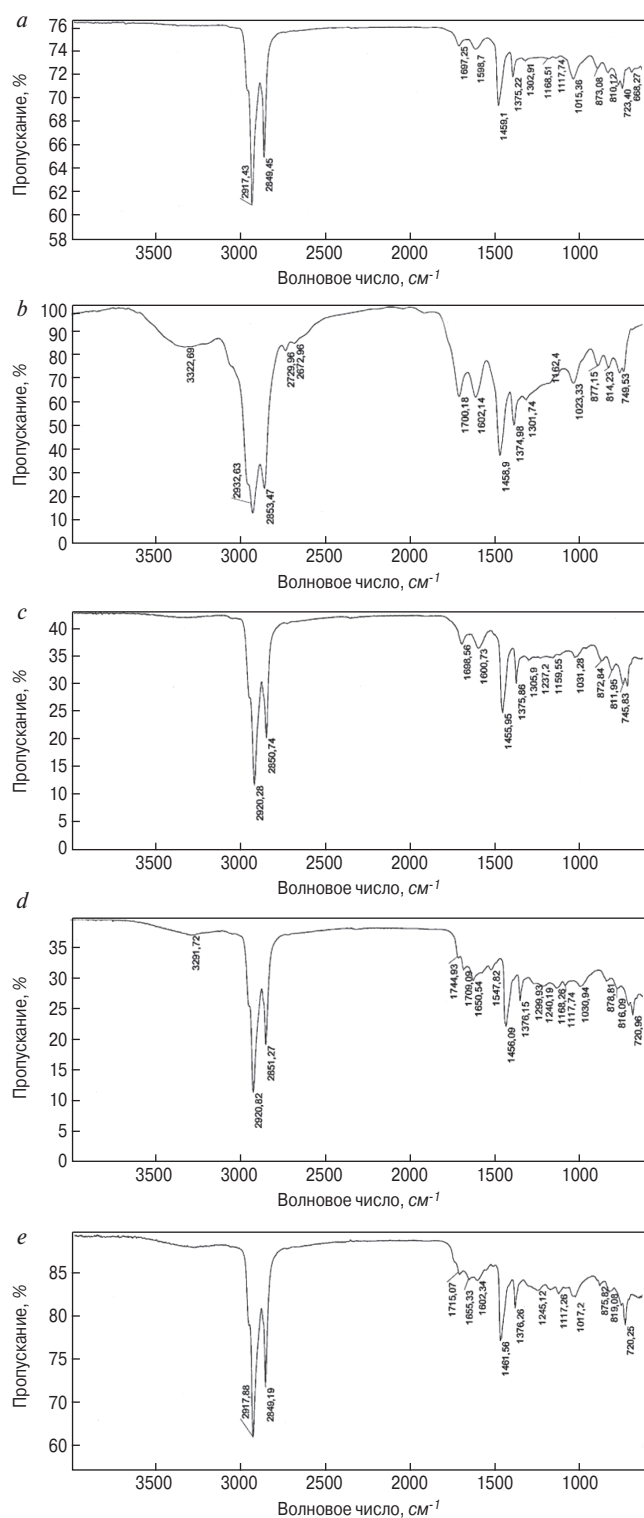
На базе Ивановского государственного химико-технологического университета с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH (Чехия) было произведено количественное определение химического состава извлеченного битума в зависимости от вида растворителей, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1
Table 1

Характеристики применяемых для рекуперации битума растворителей
Characteristics of solvents used for bitumen recovery

Наименование	Плотность при 20°C, кг/м ³	Температура воспламенения, °C	Температура кипения, °C
Технический керосин КТ-1	783	216	170
Трихлорэтилен (C ₂ HCl ₃)	1460	271	87
Хлороформ (CHCl ₂)	1489	263	61
Тетрахлорметан (CCl ₄)	1593	283	77

По результатам проведенного анализа установлено, что наиболее близким составом извлеченного битума к контрольному образцу является образец № 2 с растворителем трихлорэтиленом (C₂HCl₃). Вместе с тем после использования органических



Инфракрасные спектры поглощения исследуемых составов: a – контрольный образец; b – образец 1; c – образец 2; d – образец 3; e – образец 4
Infrared absorption spectra: a – control sample; b – sample 1; c – sample 2; d – sample 3; e – sample 4

Таблица 2
Table 2

Сводная таблица количественного химического состава элементов битума в зависимости от растворителей
Summary table of quantitative chemical composition of bitumen elements depending on solvents

Химический элемент	Содержание в исследуемых образцах, %				
	К	1	2	3	4
C	74,76	82,44	77,95	92,55	80,07
N	3,9	–	–	–	–
O	16,15	12,93	17,27	5,38	13,52
Na	1,34	0,33	0,19	0,12	1,39
Mg	0,07	0,95	–	0,02	0,09
Al	0,10	–	2,62	0,04	0,15
Si	0,31	1,14	0,05	0,05	0,4
P	0,10	–	–	–	–
S	0,44	0,79	0,78	1,46	0,93
Cl	1,69	0,36	0,17	0,07	1,5
K	0,9	0,24	0,05	–	0,8
Ca	0,2	0,23	–	–	0,45
Fe	0,05	0,37	–	0,08	0,35
Co	–	0,11	–	–	0,09
Br	–	0,12	–	–	–
Zn	–	–	0,92	–	–
Ti	–	–	–	0,22	0,19
Cu	–	–	–	–	0,08
Сумма:	100	100	100	100	100

Таблица 3
Table 3

Волновые значения ИК-спектров контрольного образца битума, извлеченного без применения растворителей
Wave values of IR spectra of a control sample of bitumen extracted without the use of solvents

Волновое число, см ⁻¹	Описание
2917,43	Асимметричные валентные колебания CH ₂ (V _{ас})
2849,45	Симметричные валентные колебания CH ₂ (V _{ас})
1697,25	C=O (продукты окисления, скорее кислота) (V _{ас})
1598,7	Колебание ароматического кольца
1459,1	Деформационные колебания CH ₂ (δ)
1375,2	Деформационные колебания CH ₃ (δ)
1015,36	–C–O–C– простая эфирная группа
873, 810, 723, 668	Различные виды замещения в ароматическом кольце (–1,3,5; –1,4; –1,2 и монозамещение)

растворителей в химическом составе полученных битумов отсутствует фосфор и азот, а появление несвойственных для битума химических элементов в его составе объясняется растворением загрязнений и примесей, приобретенных в процессе эксплуатации.

Для изучения состава и структуры битума, а также определения функциональных групп проводилась

ИК-спектроскопия на приборе Спектрофотометр ИК-Фурье Avatar 360 Nicolet, США. Расшифровка волновых значений проводилась с помощью базы данных (рисунок; табл. 3).

При извлечении битума с помощью тетрахлорметана и хлороформа в спектрах появляются полосы: 1744 см⁻¹ – продукт окисления (алифатический сложный эфир –C=O); 1650 и 1547 см⁻¹ – предположительно относятся к амидной группе –NHС=O, полоса NH закрыта полосой –OH (3291,7 см⁻¹) [5–7].

В целом основные полосы сохраняются, а появление дополнительных слабых полос можно объяснить или хорошей экстрагирующей способностью растворителей, или растворители сами содержали примеси, так как на чистоту не проверялись.

Основные полосы битума, извлеченного растворителями трихлорэтиленом и керосином, совпадают с основными полосами исходного битума. Но стоит обратить внимание на полосы 740 и 723 см⁻¹: интенсивности этих полос становятся равными, чего не наблюдается при использовании хлороформа и ССl₄ и в исходном битуме, где полоса 740 см⁻¹ проявляется слабым плечом. Данные полосы можно рассматривать как относящиеся к замещению в ароматическом кольце, так и к структурным изменениям [8].

Полоса 740–745 см⁻¹ – маятниковое колебание (–CH₂)₄, т. е. возникает разветвление у 4-го углеродного атома; 720–723 см⁻¹ – маятниковые колебания в (–CH₂)_{≥5}. Увеличение интенсивности полос 2932,8 и 2853 см⁻¹ (относящихся к валентным колебаниям группы –CH₂) в спектре битума, извлеченного керосином, предположительно можно отнести к тяжелым углеводородным примесям в керосине [9].

Проанализировав ИК-спектры, можно сделать вывод, что структурные фрагменты контрольного образца битума и образца № 2 (трихлорэтилен) совпадают, это объективно коррелирует с данными, представленными ранее с химическим составом.

На базе НИУ МГСУ сделан синхронный термический анализ с помощью прибора синхронного термического анализа (ТГА/ДСК/ДТА) SDT Q 600 TA Instruments.

Анализируя изменения, происходящие во всех исследуемых образцах битумов, и оценивая характер кривых ТГА и ДСК, было установлено, что термическое разложение изучаемых объектов происходит в три стадии. I стадия проходит в области температуры от 200 до 350°C; II стадия – 300–500°C и III стадия – 460–600°C [10, 11].

I стадия характеризуется экзотермическим максимумом в температурном интервале 200–350°C. Потеря массы составила от 4,58 до 6,03%. Наибольшая потеря массы для битума, обработанного хлороформом, составила 12,31%, что скорее всего связано с более низкой температурой кипения растворителя по сравнению с другими (61,2°C).

II стадия имеет от 3 до 6 экзотермических максимумов в интервале температуры 300–500°C. Потеря массы составляет от 6,85 до 55,83%. Количество ана-

Таблица 4
Table 4

Результаты синхронного ТГА и ДСК анализа исследуемых образцов
Results of TGA and DSC analysis

Экзотермические максимумы	Рассматриваемые показатели	Исследуемые составы				
		К	1	2	3	4
Температурный интервал 300–360°C						
I	Температура, °С (при максимуме пика)	330	330	348	326	328
	Потеря массы, %	4,58	6,03	5,73	12,31	4,86
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	2,71	2,84	2,67	3,36	2,88
Температурный интервал 300–500°C						
II	Температура, °С (при максимуме пика)	368	376	–	366	376
	Потеря массы, %	6,85	16,88	–	21,68	12,36
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	3,03	5,95	–	7,54	5,08
	Энергия активации, кДж/моль	–	4,451	–	4,816	3,914
	Температура, °С (при максимуме пика)	392	404	394	404	402
	Потеря массы, %	11,51	25,35	16,48	31,66	19,15
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	3,94	2,6	6,42	3,74	3,55
	Энергия активации, кДж/моль	–	–	4,465	–	–
	Температура, °С (при максимуме пика)	410	–	–	414	418
	Потеря массы, %	18,62	–	–	35,33	25,98
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	3,38	–	–	3,54	3,71
	Температура, °С (при максимуме пика)	424	424	–	–	–
	Потеря массы, %	24,35	35,44	–	–	–
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	4,48	2,97	–	–	–
	Температура, °С (при максимуме пика)	442	–	–	438	438
	Потеря массы, %	33,46	–	–	46,28	35,06
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	–	–	–	3,35	3,26
	Температура, °С (при максимуме пика)	458	450	452	456	–
	Потеря массы, %	43,03	43,29	36,21	55,83	–
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	3,21	4,43	3,06	3,14	–
	Температура, °С (при максимуме пика)	–	–	470	–	–
Потеря массы, %	–	–	46,14	–	–	
Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	–	–	2,97	–	–	
Температурный интервал 460–650°C						
III	Температура, °С (при максимуме пика)	536	532	574	536	536
	Потеря массы, %	71,97	83,17	80,07	87,06	75,2
	Тепловой эффект экзотермической реакции, кДж	15,89	16,29	12,63	17,59	15,77
	Энергия активации, кДж/моль	5,877	6,245	6,455	6,15	5,932

литических пиков изменяется в зависимости от обработанных образцов: контрольный образец К – 6 пиков; образец № 1 – 4 пика; образцы № 2 и 3 – по 4 пика и образец № 4 содержит 3 пика.

Как видно из графиков, наибольший эффект возгорания летучих веществ происходит у образца, обработанного хлороформом.

На этой стадии происходит процесс термического разложения образцов битума [12, 13]. При температуре выше 400°C во всех образцах битума начи-

нают проявляться эндотермические эффекты, связанные с выделением газообразных продуктов. Наиболее активно этот эффект проявляется у образцов битума, извлеченного из рубероида с помощью тетрахлорметана.

На III стадии наблюдается один экзотермический максимум в области температуры от 460 до 600°C. Потеря массы составляет от 71,97 до 87,06%. Для битума, обработанного хлороформом, потеря массы составляет 87,06%. На этой стадии происхо-

Таблица 5
Table 5Значение энергии активации
Activation energy value

Номер состава	II пик				III пик			
	T_0	T_{\max}	$T_{\text{кон}}$	E_A	T_0	T_{\max}	$T_{\text{кон}}$	E_A
К	–	–	–	–	482	536	590	5,877
1	356	376	400	4,451	480	532	600	6,245
2	374	394	436	4,465	506	574	650	6,455
3	350	366	400	4,816	480	536	600	6,15
4	300	376	400	3,914	462	536	600	5,932

Примечания: T_0 – температура, при которой начинается экзотермический процесс; T_{\max} – температура, при которой находится максимум экзотермического пика; $T_{\text{кон}}$ – температура, при которой заканчивается экзотермический процесс; E_A – энергия активации, кДж/моль [14–16].

дят процессы окисления и полного сгорания образцов битума.

По максимальной температуре теплового эффекта можно сказать, что образец, обработанный трихлорэтиленом, является более термоустойчивым по сравнению с другими.

По кривой ТГА для более выраженных экзотермических пиков были рассчитаны значения энергии активации, которые позволяют судить о прочности связей в табл. 5.

По второй ступени можно заключить, что наиболее прочные связи наблюдаются у образца, обработанного хлороформом, и составляют $E_A=4,816$ кДж/моль. Менее прочные связи у образца, обработанного тетрахлорметаном – $E_A=3,914$ кДж/моль.

Наиболее термоустойчивый образец – битум, обработанный трихлорэтиленом, менее устойчивый – битум, обработанный хлороформом.

При полном сгорании пробы наиболее прочные связи находятся у образца, обработанного трихлорэтаном – $E_A=6,455$ кДж/моль. Менее прочные связи у необработанного образца – $E_A=5,877$ кДж/моль.

Наиболее термоустойчивый образец битума, обработанный трихлорэтиленом, менее устойчивый битум, обработанный керосином.

Список литературы

1. Короткова Л.Н., Иванова О.В., Халиков Р.М., Воробьев Н.А. Рекуперационное использование битумно-полимерных отходов мягких кровель в строительстве автомобильных дорог // *The Scientific Heritage*. 2021. № 72–1 (72). С. 71–75.
2. Нетфуллова Л.Ш., Мурафа А.В., Макаров Д.Б., Хозин В.Г., Рахматуллина А.П. Битумные эмульсии на основе смеси анионоактивных ПАВ кровельного и гидроизоляционного назначения // *Строительные материалы*. 2005. № 3. С. 52–54.
3. Сангариева Э.Н., Мусостов Ш.И., Ибрагимов А.А. Взаимосвязь дисперсной структуры и свойств нефтяных битумов, полученных по раз-

Выводы

Исследуемые составы рекуперационных битумов отличаются не только химическим элементарным составом, но и качеством внутренних химических связей. Такие изменения происходят из-за влияния растворителей в процессе рекуперации. По проведенным исследованиям, наибольшей степенью подобности относительно контрольного образца является битум, рекуперированный с применением трихлорэтилена. Вместе с тем по максимальной температуре теплового эффекта можно сказать, что образец, обработанный трихлорэтиленом, является более термоустойчивым по сравнению с другими, это указывает на эффективность его применения в качестве растворителя для рекуперации битума.

Вместе с тем извлеченные битумы отличаются повышенной стойкостью к температуре, что особенно актуально при их применении в качестве вяжущего для асфальтобетонных смесей с высокой технологической температурой производства. К наиболее рациональной области применения относятся литые асфальтобетонные смеси при условии соответствия показателей качества извлеченного битума нормативным значениям.

References

1. Korotkova L.N., Ivanova O.V., Khalikov R.M., Vorobyev N.A. Recuperative use of bitumen-polymer waste of soft roofs in the construction of highways. *The Scientific Heritage*. 2021. No. 72–1 (72), pp. 71–75. (In Russian).
2. Netfullova L.Sh., Murafa A.V., Makarov D.B., Khozin V.G., Rakhmatullina A.P. Bitumen emulsions based on a mixture of anionactive surfactants for roofing and waterproofing purposes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 3, pp. 52–54. (In Russian).
3. Sangarieva E.N., Musostov Sh.I., Ibragimov A.A. The relationship of the dispersed structure and properties of petroleum bitumen obtained by various technolo-

- личным технологиям // *Вестник магистратуры*. 2021. № 4–1 (115). С. 22–28.
4. Суховило Н.П., Ткачев С.М. Особенности структуры и свойств дорожных битумов, полученных по различным технологиям // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2016. № 3. С. 153–159.
 5. Рудаков Е.О., Урханова Л.А., Шадрин Н.В., Борисова А.А. Структурно-морфологический анализ битумного вяжущего, модифицированного коллоидной добавкой // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-26-29>
 6. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2017. № 6 (58). С. 140–147.
 7. Клешнин Н.А. Исследование структуры и свойств битумно-полимерного вяжущего при добавлении адгезионной добавки // *Научно-исследовательский центр «Technical Innovations»*. 2022. № 9–1. С. 548–551.
 8. Ондар С.А., Солдуп Ш.Н., Михайленко М.А., Тасоол Л.Х. Исследование продуктов сверхкритической экстракции каменных углей Чаданского месторождения методами термогравиметрии и ИК-спектроскопии // *Химия твердого топлива*. 2019. № 2. С. 10–14.
 9. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Определение термодинамических свойств битумов методом моделирования их структуры // *Труды Академэнерго*. 2008. № 4. С. 77–87.
 10. Исраилова З.С., Страхова Н.А. Влияние термического воздействия на структуру и свойства нефтяных битумов // *Естественные и технические науки*. 2012. № 1 (57). С. 385–386.
 11. Берг Г.Г. Введение в термографию. М.: Наука, 1969. 396 с.
 12. Тейтельбаум Б.Я. Термомеханический анализ полимеров. М.: Наука, 1979. 236 с.
 13. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 528 с.
 14. Шестак Я. Теория термического анализа: физико-химические свойства твердых неорганических веществ. М.: Мир, 1987. 456 с.
 15. Кутянин Г.Н., Осташенко А.С. Исследование термостойкости коллагена дифференциальными термическим и термографическим методами // *Доклады Академии наук СССР*. 1971. № 4.
 16. Кондратьев В.Н., Франкевич Е.Л. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону: Справочник. М.: Издательство Академии наук СССР, 1962. 216 с.
 - gies. *Vestnik magistratury*. 2021. No. 4–1 (115), pp. 22–28. (In Russian).
 4. Sukhovilo N.P., Tkachev S.M. Features of the structure and properties of road bitumen obtained by various technologies. *Vestnik of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences*. 2016. No. 3, pp. 153–159. (In Russian).
 5. Rudakov E.O., Urkhanova L.A., Shadrinov N.V., Borisova A.A. Structural and morphological analysis of bituminous binder modified with colloidal additive. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 26–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-26-29>
 6. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Obukhov A.G., Esipova Yu.Yu. Resistance of modified binders based on oxidized and residual bitumen to thermal degradation *Vestnik of the Siberian State Automobile and Road University*. 2017. No. 6 (58), pp. 140–147. (In Russian).
 7. Kleshnin N.A. Investigation of the structure and properties of a bitumen-polymer binder with the addition of an adhesive additive. *Scientific Research Center "Technical Innovations"*. 2022. No. 9–1, pp. 548–551. (In Russian).
 8. Ondar S. A., Soldup Sh. N., Mikhailenko M. A., Tasool L. H. Investigation of products of supercritical extraction of coal from the Chadan deposit by methods of thermogravimetry and IR spectroscopy. *Khimiya tverdogo topliva*. 2019. No. 2, pp. 10–14. (In Russian).
 9. Ermolaev D.V., Mingaleeva G.R. Determination of thermodynamic properties of bitumen by modeling their structure. *Trudy Akademenergo*. 2008. No. 4, pp. 77–87. (In Russian).
 10. Israilova Z.S., Strakhova N.A. The influence of thermal effects on the structure and properties of petroleum bitumen. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2012. No. 1 (57), pp. 385–386.
 11. Berg G.G. Vvedenie v termografiyu [Introduction to thermography]. Moscow: Nauka. 1969. 396 p.
 12. Teitelbaum B.Ya. Termomekhanicheskii analiz polimerov [Thermomechanical analysis of polymers] Moscow: Nauka. 1979. 236 p.
 13. Wendlandt U. Termicheskie metody analiza [Thermal methods of analysis] Moscow: Mir. 1978. 528 p.
 14. Shestak Ya. Teoriya termicheskogo analiza: Fiziko-khimicheskie svoistva tverdykh neorganicheskikh veshchestv [Theory of thermal analysis: Physico-chemical properties of solid inorganic substances]. Moscow: Mir. 1987. 456 p.
 15. Kutyanin G.N., Ostashenko A.S., Study of collagen heat resistance by differential thermal and thermographic methods. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1971. No. 4.
 16. Kondratiev V.N., Frankevich E.L. Energii razryva khimicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu. Spravochnik. [The energy of breaking chemical bonds. Ionization potentials and electron affinity. Directory]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1962. 216 p.

УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-73-78>

Г.Л. САФИНА, канд. техн. наук (minkinag@mail.ru)

Филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в г. Мытищи (141006, Московская обл., г. Мытищи, Олимпийский пр., 50)

Численное решение задачи фильтрации с тремя типами частиц

Укрепление автодорог состоит в повышении их прочности и устойчивости путем усиления строительных компонентов. Этот процесс может включать в себя различные методы и технологии. Одним из таких методов является инъекционный способ стабилизации грунтов, при котором специальные составы впрыскиваются под дорожное полотно для повышения его прочности и устойчивости к разрушению. Этот метод используется для усиления дорог, которые имеют деформации или трещины, что приводит к повышенному износу и снижению их эксплуатационных характеристик. Исследование фильтрации суспензии в ходе укрепления грунтов является важной задачей, которая позволяет определить эффективность и результативность применяемой технологии. Фильтрация суспензии взвешенных частиц в пористой среде является процессом, при котором частицы суспензии проникают через поры в пористой среде, в результате чего они задерживаются на их поверхности, тем самым образуя осадок. В работе рассматривается движение жидкости, содержащей три вида частиц, отличающихся друг от друга размерами. Предполагается, что осаждение частиц большего размера более вероятно, чем частиц меньшего размера. Исследуются концентрации осажденных частиц для каждого типа и концентрации полного осадка в зависимости от параметров задачи, строятся их графики для различных значений времени. Показано, что концентрации осажденных самых крупных частиц всегда являются монотонно убывающими функциями. Концентрации мелких осажденных частиц всегда до определенного момента времени также являются монотонно убывающими функциями, затем становятся немонотонными, имеющими точку максимума, а концентрации средних осажденных частиц могут быть как монотонными, так и немонотонными.

Ключевые слова: пористая среда, глубинная фильтрация, осажденные частицы, взвешенные частицы, пористая среда, концентрации, полный осадок.

Для цитирования: Сафина Г.Л. Численное решение задачи фильтрации с тремя типами частиц // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-73-78>

G.L. SAFINA, Candidate of Sciences (Engineering) (minkinag@mail.ru)

Moscow State University of Civil Engineering Branch in Mytishchi (50, Olympic Avenue, Mytishchi, Moscow Region, 141060)

Numerical Solution of the Filtration Problem with Three Types of Particles

Road strengthening consists of increasing their strength and stability by reinforcing the construction components. This process can involve a variety of methods and techniques. One such method is the injection method of soil stabilization, in which special compositions are injected under the road bed to increase its strength and resistance to breakage. This method is used to strengthen roads that are deformed or cracked, resulting in increased wear and reduced performance. The study of suspension filtration during the strengthening of soils is the important problem to determine the effectiveness and efficiency of the technology used. Filtration of a suspension of suspended particles in a porous medium is a process whereby the particles of the suspension penetrate through the pores in the porous medium, causing them to be trapped on the surface of the pores, thereby forming a deposit. This paper considers the motion of a fluid containing three kinds of particles that differ in size from each other. It is assumed that the deposition of larger particles is more likely than that of smaller particles. Concentrations of retained particles for each type of particles and concentrations of total deposit as a function of problem parameters are investigated, their graphs for different values of time are plotted. It is shown that concentrations of the largest retained particles are always monotonically decreasing functions. Concentrations of smallest retained particles are always monotonically decreasing functions up to a certain point of time, then they become non-monotonous, having a maximum point, and concentrations of medium retained particles can be both monotonous and non-monotonous.

Keywords: porous medium, deep bed filtration, retained particles, suspended particles, concentrations, total deposit.

For citation: Safina G.L. Numerical solution of the filtration problem with three types of particles. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 73–78. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-73-78>

В процессе эксплуатации автодорог многочисленные факторы отрицательно влияют на их жизнеспособность. Они подразделяются на две группы: внешние и внутренние. К первой группе относятся нагрузки автомобильного транспорта [1, 2] и природно-климатические условия [3, 4], ко второй – механические и физические характеристики возведенных дорожных конструкций и дорожной одежды, состоящей, как правило, из нескольких слоев [5, 6]. Для предотвращения возникновения деформаций и разрушений дорожных покрытий при строительстве и

ремонтных работах автодорог необходимо использовать эффективные методы их укрепления.

В настоящее время существует множество разнообразных технологий укрепления оснований автодорог [7–9]. Одной из них является подача инъекционного раствора в грунт, который проникает в пористую среду, образует осадок из твердых частиц, тем самым усиливая свойства грунта [10–12].

Исследование движения укрепляющего раствора в пористой среде является важным подготовительным этапом процесса инъектирования с целью до-

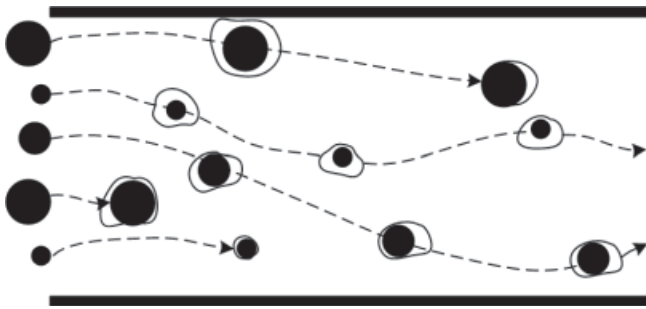


Рис. 1. Размерный механизм захвата частиц при движении суспензии с тремя типами частиц в пористой среде
Fig. 1. Size-exclusion capture mechanism of particles during the motion of suspension with three types of particles in a porous medium

стижения его максимальной эффективности. Во множестве научных работ представлены результаты изучения фильтрации суспензии в пористой среде. В [13–15] рассматривается фильтрация монодисперсной суспензии, работы [16–18] посвящены двухдисперсным растворам.

В данной работе моделируется движение суспензии, содержащей частицы трех различных размеров: крупных, средних и мелких. Математическая модель задачи основана на размерном механизме захвата частиц; когда взаимодействием между частицами пренебрегается, частицы, имеющие больший диаметр, чем диаметр поры, свободно проникают через нее, в противном случае происходит ее закупоривание (рис. 1).

Математическая модель

Математическая модель задачи включает уравнения баланса масс взвешенных и осажденных частиц, а также уравнений скоростей образования осадка тремя типами частиц:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial S_i(x,t)}{\partial t} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial S_i(x,t)}{\partial t} = \Lambda_i(S_1, S_2, S_3) C_i(x,t), \quad i = 1, 2, 3, \tag{2}$$

где функции $C_i(x,t)$, $i = 1, 2, 3$ – концентрации взвешенных частиц; функции $S_i(x,t)$, $i = 1, 2, 3$ – концентрации осажденных частиц; функции $\Lambda_i(S_1, S_2, S_3)$, $i = 1, 2, 3$ – функции фильтрации каждого вида частиц.

Заданные граничные условия для каждого типа частиц имеют вид:

$$C_i(0, t) = C_i^0, \quad i = 1, 2, 3, \tag{3}$$

причем $\sum_{i=1}^3 C_i^0 = 1$.

Начальные условия заданы уравнениями:

$$C_i(x, 0) = 0, \quad S_i(x, 0) = 0, \quad i = 1, 2, 3. \tag{4}$$

Будем рассматривать функции фильтрации вида:

$$\Lambda_i = \lambda_i (1 - \beta_1 C_1^0 S_1(x,t) - \beta_2 C_2^0 S_2(x,t) - \beta_3 C_3^0 S_3(x,t)),$$

где λ_i и β_i – некоторые положительные константы.

Для определенности будем считать, что самыми крупными частицы являются частицы первого типа, средними – частицы второго типа и самыми мелкими – частицы третьего типа, поэтому $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$. Использование коэффициентов $\beta_1 C_1^0$, $\beta_2 C_2^0$ и $\beta_3 C_3^0$ позволяет учитывать различные вероятности оседания частиц каждого типа.

Задача решается в области $\Phi = \begin{cases} 0 \leq x \leq 1 \\ t \geq 0 \end{cases}$. Линия $t=x$, называемая фронтом концентраций, разделяет область на две подобласти. $\Phi^1 = \begin{cases} 0 \leq x \leq 1 \\ 0 \leq t < x \end{cases}$ и $\Phi^2 = \begin{cases} 0 \leq x \leq 1 \\ t > x \end{cases}$

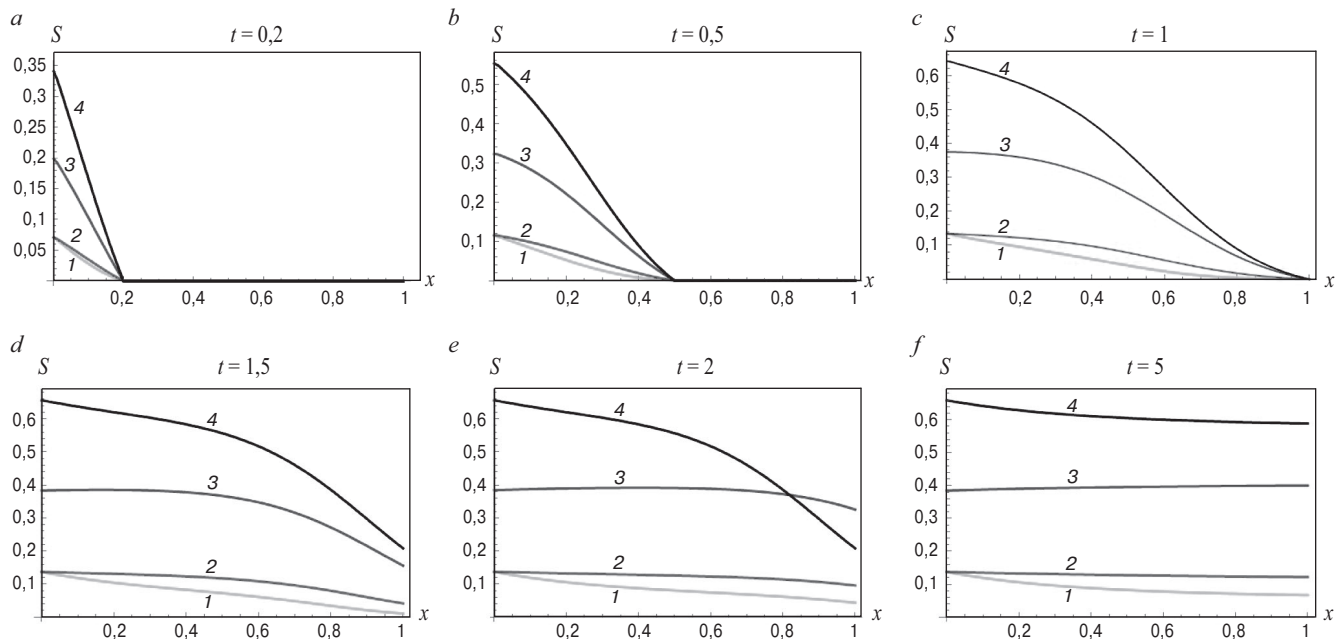


Рис. 2. Концентрации осажденных частиц каждого типа и полного осадка для первого набора параметров задачи при различных временных значениях t : $a - t=0,2$; $b - t=0,5$; $c - t=1$; $d - t=1,5$; $e - t=2$; $f - t=5$; 1 – крупный размер; 2 – средний размер; 3 – мелкий размер; 4 – полный осадок
Fig. 2. Concentrations of retained particles of each type and total sediment for the first set of parameters at different time values: $a - t=0.2$; $b - t=0.5$; $c - t=1$; $d - t=1.5$; $e - t=2$; $f - t=5$; 1 – large size; 2 – medium size; 3 – small size; 4 – full sediment

В подобласти Φ^1 : $C_i(x,t)=0$ и $S_i(x,t)=0$, $i=1, 2, 3$. В подобласти Φ^2 : $C_i(x,t)>0$ и $S_i(x,t)>0$, $i=1, 2, 3$. На фронте концентраций $C_i(x,t)>0$ и $S_i(x,t)=0$, $i=1, 2, 3$, поэтому вдоль линии $t=x$ решения $S_i(x,t)$, $i=1, 2, 3$ непрерывны, в то время как решения $C_i(x,t)$, $i=1, 2, 3$ разрывны.

Для нахождения решений $S_i(x,t)$, $i=1, 2, 3$ на входе фильтра, используя выражения (3), необходимо решить неоднородную систему дифференциальных уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{\partial S_1}{\partial t} = \lambda_1(1 - \beta_1 C_1^0 S_1 - \beta_2 C_2^0 S_2 - \beta_3 C_3^0 S_3) C_1^0; \\ \frac{\partial S_2}{\partial t} = \lambda_2(1 - \beta_1 C_1^0 S_1 - \beta_2 C_2^0 S_2 - \beta_3 C_3^0 S_3) C_2^0; \\ \frac{\partial S_3}{\partial t} = \lambda_3(1 - \beta_1 C_1^0 S_1 - \beta_2 C_2^0 S_2 - \beta_3 C_3^0 S_3) C_3^0. \end{cases}$$

Решая сначала соответствующую однородную систему уравнений методом Эйлера, а затем используя метод вариации произвольных постоянных с учетом условий (4), получаем:

$$S_1(0,t) = \frac{\lambda_1 C_1^0 (1 - e^{-Rt})}{R}; S_2(0,t) = \frac{\lambda_2 C_2^0 (1 - e^{-Rt})}{R}; S_3(0,t) = \frac{\lambda_3 C_3^0 (1 - e^{-Rt})}{R},$$

где $R = \lambda_1 \beta_1 (C_1^0)^2 + \lambda_2 \beta_2 (C_2^0)^2 + \lambda_3 \beta_3 (C_3^0)^2$.

На фронте концентраций $S_i(x,t)=0$, $i=1, 2, 3$, тогда функции фильтрации имеют вид $\Lambda_i = \lambda_i$, $i=1, 2, 3$, а уравнения (2):

$$\frac{\partial S_i(x,t)}{\partial t} = \lambda_i C_i(x,t), \quad i=1, 2, 3.$$

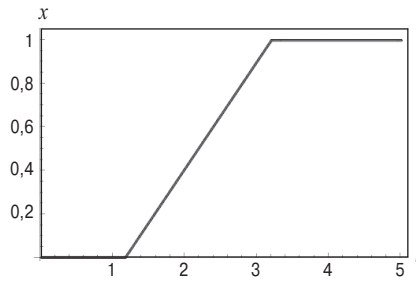


Рис. 3. Перемещение точки максимума $S_3(x,t)$
Fig. 3. Moving the maximum point of $S_3(x,t)$

После перехода к характеристическим переменным $\tau=t-x$, $x=x$ в уравнениях (1) получаем:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + \lambda_i C_i(x,t) = 0, \quad i=1, 2, 3.$$

Решениями уравнений с разделяющимися переменными являются:

$$C_i^f = C_i^0 e^{-\lambda_i x}, \quad i=1, 2, 3.$$

Результаты численного моделирования

Будем решать задачу численно с применением конечных разностных схем. При аппроксимации производных первого порядка правыми разностями используем шаги $h_x = h_t = 0,1$, что обеспечивает сходимость алгоритма [19].

В качестве коэффициентов фильтрации будем использовать значения $\lambda_1 = 5 > \lambda_2 = 2,5 > \lambda_3 = 2$. Рассмотрим первый набор параметров задачи: $C_1^0 = 0,1$, $C_2^0 = 0,2$, $C_3^0 = 0,7$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 6$, $\beta_3 = 3$. На рис. 2 представлены графики концентраций осажденных частиц крупного размера $S_1(x,t)$ (линия 1), среднего размера $S_2(x,t)$ (линия 2), мелкого размера $S_3(x,t)$ (линия 3) и полного осадка $S(x,t)$ (линия 4) при различных временных значениях.

Полученные графики показывают, что концентрации $S_1(x,t)$, $S_2(x,t)$ и $S_3(x,t)$ убывают для всех $x \in [0;1]$. Решение $S_3(x,t)$ монотонно убывает приблизительно до момента времени $t \approx 1,2$, затем ведет себя немонотонно: сначала возрастает, достигая своего максимума, затем убывает. Начиная с момента $t \approx 3,2$ концентрации $S_3(x,t)$ являются монотонно возрастающими

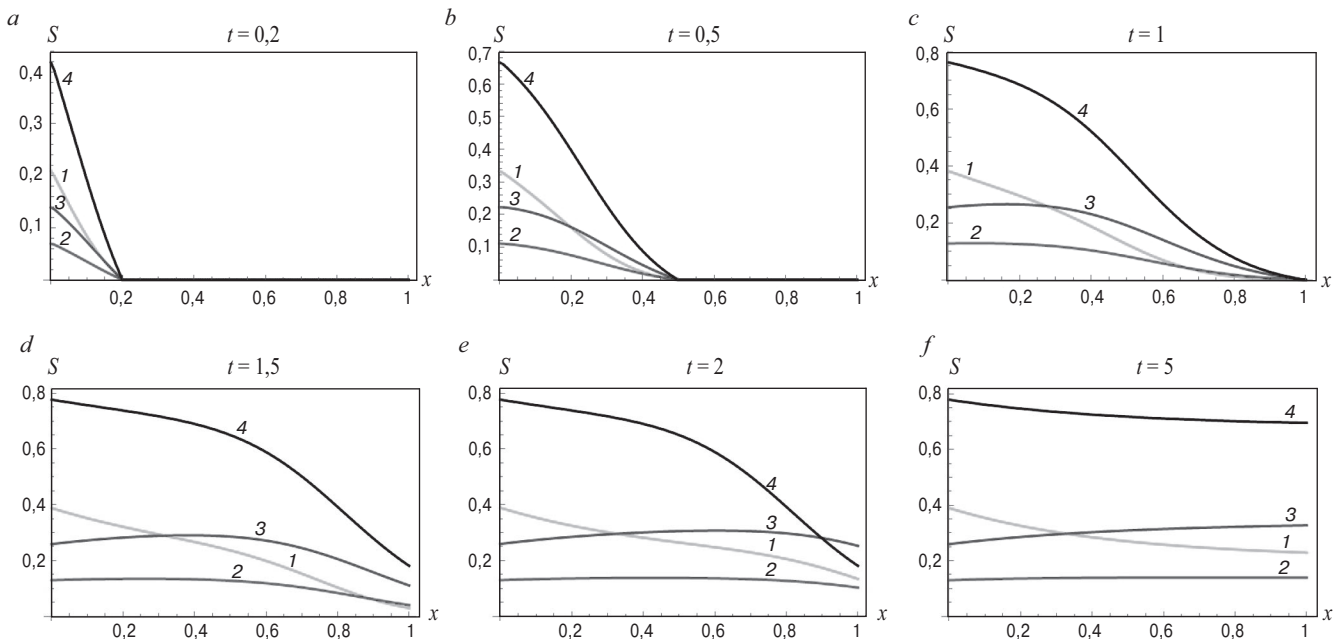


Рис. 4. Концентрации осажденных частиц каждого типа и полного осадка для второго набора параметров задачи при различных временных значениях t : а - $t=0,2$; б - $t=0,5$; в - $t=1$; д - $t=1,5$; е - $t=2$; ф - $t=5$; 1 - крупный размер; 2 - средний размер; 3 - мелкий размер; 4 - полный осадок
Fig. 4. Concentrations of retained particles of each type and total sediment for the second set of parameters at different time values: а - $t=0.2$; б - $t=0.5$; в - $t=1$; д - $t=1.5$; е - $t=2$; ф - $t=5$; 1 - large size; 2 - medium size; 3 - small size; 4 - full sediment

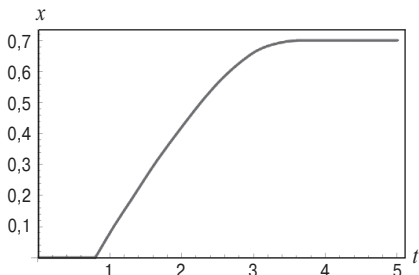


Рис. 5. Перемещение точки максимума $S_2(x, t)$
 Fig. 5. Moving the maximum point of $S_2(x, t)$

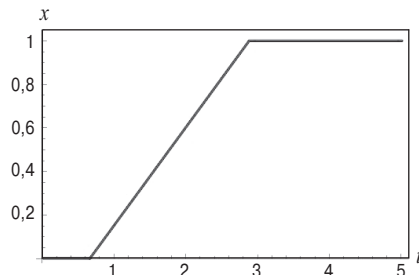


Рис. 6. Перемещение точки максимума $S_3(x, t)$
 Fig. 6. Moving the maximum point of $S_3(x, t)$

функциями на отрезке $[0;1]$. Перемещение точки максимума $S_3(x, t)$ вдоль всей длины фильтра показано на рис. 3.

На рис. 4 представлены графики концентраций осажденных частиц каждого типа и полного осадка, аналогичные рис. 1, для второй комбинации параметров задачи: $C_1^0 = 0,3$; $C_2^0 = 0,2$; $C_3^0 = 0,5$; $\beta_1 = 3$; $\beta_2 = 5$; $\beta_3 = 4$.

В данном случае концентрации $S_1(x, t)$ и $S(x, t)$ являются монотонно убывающими функциями при любом значении времени t . Решения $S_2(x, t)$ и $S_3(x, t)$ убывают до определенного момента времени, затем начинают вести себя немонотонно, имеют точку максимума. На рис. 5 и 6 показаны перемещения точек максимума концентраций $S_2(x, t)$ и $S_3(x, t)$ соответственно. Из графиков видно, что максимальные концентрации взвешенных частиц среднего размера, начиная с момента времени $t \approx 3,6$, достигаются при $x = 0,7$, в то время как максимум концентраций взвешенных мелких частиц перемещается до конца фильтра.

Рассмотрим третий случай набора параметров задачи: $C_1^0 = 0,3$; $C_2^0 = 0,5$; $C_3^0 = 0,2$; $\beta_1 = 5$; $\beta_2 = 2$; $\beta_3 = 3$. Графики концентраций $S_1(x, t)$ (линия 1), $S_2(x, t)$ (линия 2), $S_3(x, t)$ (линия 3) и $S(x, t)$ (линия 4) при различных временных значениях представлены на рис. 7. Видно, что монотонно убывающими являются только концентрации крупных осажденных частиц. Графики концентраций средних и мелких осажденных частиц, а также полного

осадка в начале процесса фильтрации являются монотонно убывающими функциями, затем возникают точки максимума.

Перемещение точек максимума представлены на рис. 8 (для $S_2(x, t)$), рис. 9 (для $S_3(x, t)$) и рис. 10 (для $S(x, t)$). У концентраций средних и мелких осажденных частиц максимум появляется раньше, чем у концентрации полного осадка, при этом скорость перемещения максимумов у $S_2(x, t)$ и $S_3(x, t)$ практически одинаковая. Для всех трех функций максимумы перемещаются до выхода фильтра.

Выводы

Задача фильтрации суспензии с тремя типами частиц рассматривается впервые. Исследованы концентрации частичных и полного осадков. Аналогично [20] концентрации крупных осажденных частиц всегда монотонно убывают, это указывает на то, что они сразу же начинают интенсивно захватываться порами. Концентрации мелких осажденных частиц всегда немонотонны. Концентрации средних

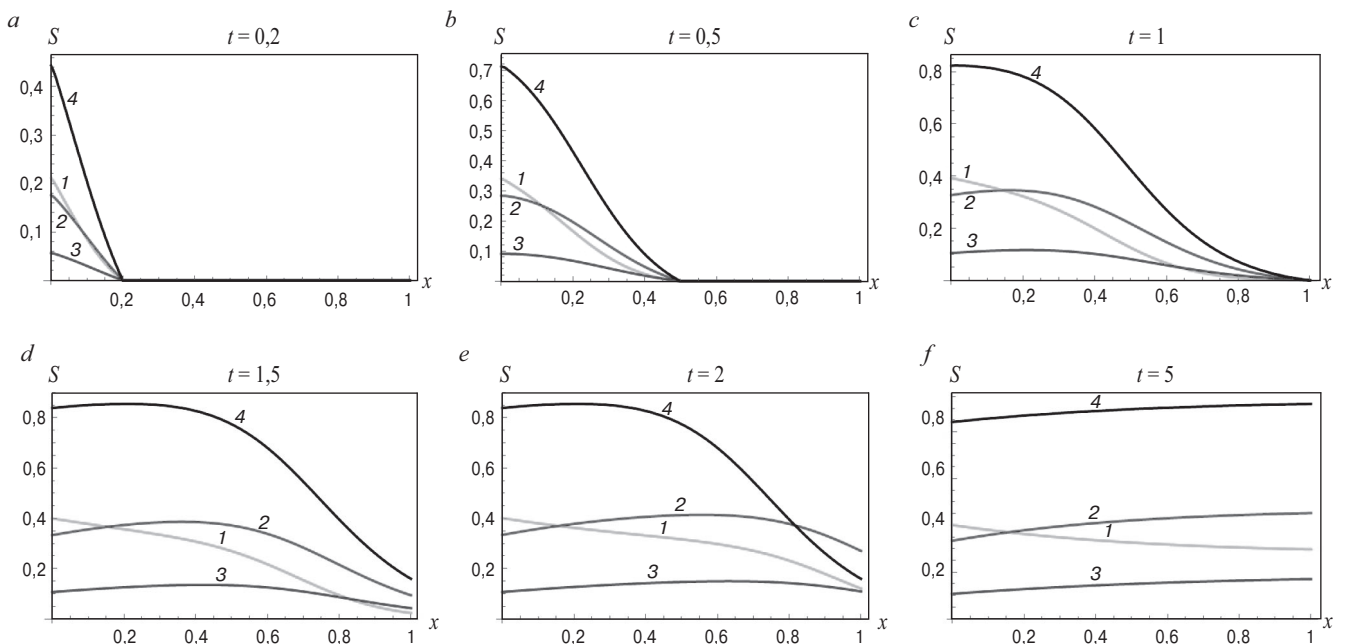


Рис. 7. Концентрации осажденных частиц каждого типа и полного осадка для третьего набора параметров задачи при различных временных значениях t : а – $t=0,2$; б – $t=0,5$; в – $t=1$; д – $t=1,5$; е – $t=2$; ф – $t=5$; 1 – крупный размер; 2 – средний размер; 3 – мелкий размер; 4 – полный осадок
 Fig. 7. Concentrations of retained particles of each type and total sediment for the third set of parameters at different time values: а – $t=0.2$; б – $t=0.5$; в – $t=1$; д – $t=1.5$; е – $t=2$; ф – $t=5$; 1 – large size; 2 – medium size; 3 – small size; 4 – full sediment

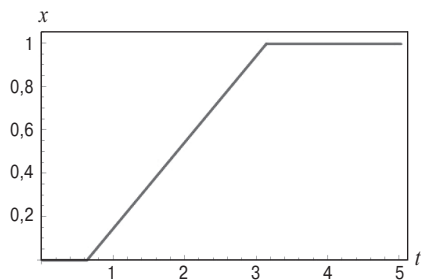


Рис. 8. Перемещение точки максимума $S_2(x,t)$

Fig. 8. Moving the maximum point of $S_2(x,t)$

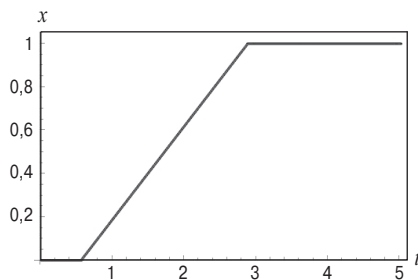


Рис. 9. Перемещение точки максимума $S_3(x,t)$

Fig. 9. Moving the maximum point of $S_3(x,t)$

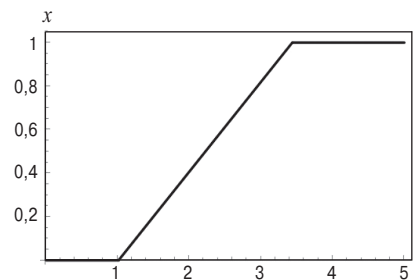


Рис. 10. Перемещение точки максимума $S(x,t)$

Fig. 10. Moving the maximum point of $S(x,t)$

осажденных частиц и полного осадка являются монотонными или немонотонными в зависимости от параметров задачи.

Немонотонные концентрации осажденных частиц имеют точку максимума. Были исследованы перемещения точек максимума в зависимости от времени. Установлено, что для выбранных параметров точки максимума концентраций полного осадка и осадка мелких частиц неограниченно растут с увеличением времени, а точка максимума концентраций средних удерживаемых частиц может быть ограничена.

Список литературы / References

1. Pankov V.Yu. New procedure to calculate the load on the roadway. *World of Transport and Transportation*. 2022. Vol. 20. Iss. 1 (98), pp. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-10>
2. Корочкин А.В. Анализ силового воздействия транспортных средств на дорожную одежду // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 6. С. 40–46.
2. Korochkin A.V. Analysis of the force influence of transport vehicles on the road clothing. *Stroitel'naja mehanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*. 2015. No. 6, pp. 40–46. (In Russian)
3. Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2022. № 4. С. 14–30. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20228414-30>
3. Alekseev S.V., Simonov D.L., Katikova A.S. The impact of natural factors on the condition of roads in different regions of Russia. *Innovacionnyye transportnye sistemy i tehnologii*. 2022. No. 4, pp. 14–30. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20228414-30>
4. Baykal T., Ergezer F., Terzi S. Prediction of highway pavement surface condition based on meteorological parameters using Deep Learning Method. *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications*. 2022. Vol. 5. Iss. 2, pp. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.51513/jitsa.1152377>
5. Barros R., Yasarer H., Sultana S. Performance evaluation of composite pavements on Mississippi highways via machine learning. *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. 2022. Vol. 4, pp. 527–534. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003222897-49>
6. Barros R., Yasarer H., Najjar Y.M. Mechanical and physical properties of recycled Concrete aggregates for road base materials. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 1973 (1). 012236. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012236>
7. Loktev A., Korolev V., Ulanov I., Savulidi M., Klekovkina N., Kuznetsov A. Theoretical approaches for modeling and calculating the consolidation of a composite weak bottom. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63 (4), pp. 938–945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.092>
8. Salnyi I., Stepanov M., Karaulov A. Experience in strengthening foundations and foundations on technogenic soils. *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 363 (5). 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302004>
9. Han P., Zhang C., He X., Wang X., Qiao Y. A. DEM fluid–solid coupling method for progressive failure simulation of roadways in a fault structure area with water-rich roofs. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022. Vol. 8. 194. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00517-9>
10. Christodoulou D., Lokkas P., Droudakis A., Spiliotis X., Kasiteropoulou D., Alamanis N. The development of practice in permeation grouting by using fine-grained cement suspensions. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 9. Iss. 6, pp. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.24203/ajet.v9i6.6846>
11. Smirnova O.M., Glazev M.V., Komolov V.V., Vilenskii M.Yu. Micro-cement for injection consolidation of base soils. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 9 (2), pp. 2173–2177. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijitee.A6142.129219>
12. Christodoulou D. Evaluation of cement gradation effect on the injectability of cement suspensions for soil grouting – a review. *Austin Environ Science*. 2022. Vol. 7 (3). 1081.

13. Кузьмина Л.В., Осипов Ю.В., Шайдуллина А.М. Динамика частиц в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 10. С. 72–77. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.10.72-77>
13. Kuz'mina L.V., Osipov Yu.V., Shajdullina A.M. Particle dynamics in a porous medium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021. No. 10, pp. 72–77. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.10.72-77>
14. Safina G.L. Filtration problem with nonlinear filtration and concentration functions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18 (1), pp. 129–140. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-129-140>
14. Safina G.L. Filtration problem with nonlinear filtration and concentration functions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18 (1), pp. 129–140. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-129-140>
15. Кузьмина Л.В., Осипов Ю.В., Соседка М.Г. Фильтрация в пористой среде с двумя механизмами захвата // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 10. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.07.48-53>
15. Kuz'mina L.V., Osipov Yu.V., Sosedka M.G. Filtration in a porous medium with two capture mechanisms. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 10, pp. 48–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.07.48-53>
16. Сафина Г.Л. Расчет профилей осадка двухчастичной суспензии в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 11. С. 110–114. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.11.110-114>
16. Safina G.L. Calculation of deposit profiles of a two-particle suspension in a porous medium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 11, pp. 110–114. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.11.110-114>
17. Сафина Г.Л. Моделирование фильтрации двухчастичной суспензии в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 2. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.02.31-35>
17. Safina G.L. Modelling of filtration of a two-particle suspension in a porous medium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 2, pp. 31–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.02.31-35>
18. Кузьмина Л., Осипов Ю., Астакхов М.Д. Фильтрация 2-частиц суспензии в пористой среде. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012001>
18. Kuz'mina L., Osipov Y., Astakhov M.D. Filtration of 2-particles suspension in a porous medium. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012001>
19. You Z., Osipov Y., Bedrikovetsky P., Kuzmina L. Asymptotic model for deep bed filtration. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 258, pp. 374–385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.051>
19. You Z., Osipov Y., Bedrikovetsky P., Kuzmina L. Asymptotic model for deep bed filtration. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 258, pp. 374–385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.051>
20. Кузьмина Л.И., Осипов Ю.В., Астакхов М.Д. Бидисперсионная проблема с немонотонной кривой удержания. *Annali di Matematica Pura ed Applicata (1923)*. 2022. Vol. 201, pp. 2943–2964. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10231-022-01227-5>
20. Kuz'mina L.I., Osipov Y.V., Astachov M.D. Bidisperse filtration problem with non-monotonic retention profiles. *Annali di Matematica Pura ed Applicata (1923)*. 2022. Vol. 201, pp. 2943–2964. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10231-022-01227-5>

Требования к статьям, направляемым для публикации в журнал «Строительные материалы»[®]

Уважаемые авторы!

Приступая к оформлению статьи для журнала внимательно ознакомьтесь с правилами и рекомендациями, размещенными на сайте издательства.

Как подготовить к публикации научно-техническую статью см. раздел <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями издания:

– текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf;

– графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;

– иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться:

- рекомендательным письмом руководителя предприятия (института);
- лицензионным договором о передаче права на публикацию;
- распечаткой, лично подписанной ВСЕМИ авторами;
- рефератом объемом не менее 150 слов на русском и английском языках;
- подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»[®], ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания;

– сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов (заполненная информационная карта).

Особое внимание библиографическим спискам!

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–5 лет в ведущих научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние 5 лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«МОСТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ»

20–22
СЕНТЯБРЯ 2023



МОСКВА
ОТЕЛЬ HOLIDAY INN SUSCHEVSKY

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка



АО ЦНИИТС



ЦНИИПСК | stako
ИМ. Мельникова
с 1880 года



НИИ СТРОИТЕЛЬСТВО
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА

С 1927 ГОДА
95
ЛЕТ

Генеральный спонсор
конференции



Генеральные информационные партнеры



ФУНДАМЕНТЫ
научно-практический журнал для проектировщиков и строителей



ОРОЖНАЯ
СРЖАВА



АВТОНОМНЫЕ
ДОРОГИ



ИТС
100 лет



ДОРОГИ



СТРОИТЕЛЬНАЯ
ОРБИТА

www.fc-union.com, info@fc-union.com, +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

12+



100+ TECHNO BUILD

X Международный
строительный форум
и выставка

forum-100.ru

3-6 октября 2023
Екатеринбург



стать экспонентом

18 720
посетителей

322
экспонента

688
спикеров

207
секций

21
страна

*показатели 2022 года