



Российская
инженерная
академия



МИНИСТЕРСТВО
ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПОЛИТИКИ
Краснодарского края



СОЮЗ «ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА
КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ»



СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы
III Международной
научно-практической конференции
15–16 октября 2025 г.





**Общероссийская общественная организация
«Российская инженерная академия» (РИА)**

**Кубанское региональное отделение Общероссийской общественной
организации «Российская инженерная академия» (КО РИА)**

Министерство промышленной политики Краснодарского края

Департамент строительства Краснодарского края

Торгово-промышленная палата Краснодарского края

Ассоциация «Железобетон»

СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

**Материалы III Международной
научно-практической конференции
(15–16 октября 2025 г.)**

**Краснодар
2025**

УДК 691.32
ББК 38.33
С56

С56 СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ : Материалы III Международной научно-практической конференции (15–16 октября 2025 г.) / Российская инженерная академия. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2025. – 88 с.

ISBN 978-5-91718-792-1

Сборник содержит материалы III Международной научно-практической конференции «Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы», проведенной в г. Краснодаре 15–16 октября 2025 года в год 35-летия Общероссийской общественной организации «Российская инженерная академия».

В настоящем издании представлены результаты исследований в области товарных бетонных смесей и монолитного бетонирования, производства бетонных и железобетонных изделий, ресурсосберегающих технологий и использование вторичного сырья, контроля качества, испытания и диагностики бетонных изделий и конструкций, особенностей нормативного регулирования, сырья и компонентов в технологии бетона.

Опубликованные материалы могут быть полезны научно-педагогическим кадрам, экспертам, специалистам индустрии строительных материалов и стройкомплекса России и зарубежья, а также другим научным работникам, практикующим специалистам и учащимся.

ББК 38.33
УДК 691.32

ISBN 978-5-91718-792-1

© Коллектив авторов, 2025
© Российская инженерная академия, 2025
© Оформление: ООО «Издательский Дом – Юг», 2025

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Председатель:

Б.В. Гусев – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, президент Российской инженерной академии (г. Москва, Россия).

Сопредседатели:

Л.А. Иванов – доктор информационных технологий, первый вице-президент и главный ученый секретарь Российской инженерной академии, действительный член РИА (г. Москва, Россия).

В.Р. Фаликман – доктор материаловедения, член Президиума Российской инженерной академии (г. Москва, Россия);

С.А. Удодов – кандидат технических наук, доцент, член президиума Российской инженерной академии, руководитель Кубанского регионального отделения, директор по научно-техническому сопровождению ООО «Центр развития строительных технологий» (г. Краснодар, Россия).

Члены оргкомитета:

В.В. Клименко – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар, Россия);

А.Н. Секисов – кандидат экономических наук, действительный член Российской инженерной академии, доцент кафедры технологии, организации, экономики строительства и управления недвижимостью Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар, Россия);

И.В. Бондаренко – преподаватель-исследователь, член-корреспондент Российской инженерной академии, генеральный директор ООО «Центр развития строительных технологий» (г. Краснодар, Россия);

В.П. Данько – кандидат технических наук, академический советник Российской инженерной академии, доцент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар, Россия);

С.А. Иванченко – технический директор ООО «Центр развития строительных технологий» (г. Краснодар, Россия);

К.Н. Мамедов – начальник управления технологии бетона AKKUYUTSRST İNŞAAT VE TEST LABORATUVARI SANAYİ TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ, соискатель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова Кубанского государственного технологического университета (г. Силифке, Турция);

Ф.А. Белов – преподаватель-исследователь, генеральный директор ЗАО «Агротранс» (п. Тульский, Россия);

А.А. Сусла – заместитель генерального директора ООО «Юг – проект изыскания», соискатель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар, Россия).

Ответственный секретарь:

Е.А. Ольховатов – кандидат технических наук, доцент, действительный член Российской инженерной академии, ученый секретарь Кубанского отделения, доцент кафедры технологии хранения и переработки растениеводческой продукции Кубанского государственного аграрного университета (г. Краснодар, Россия).

ОГЛАВЛЕНИЕ / CONTENTS

ТОВАРНЫЕ БЕТОННЫЕ СМЕСИ И МОНОЛИТНОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ COMMERCIAL CONCRETE MIXES AND MONOLITHIC CONCRETING

АбуIZEИХ Ю.К.И., Тамов М.М.

Способы подбора составов самоуплотняющихся
сверхвысокопрочных фибробетонов 7

Abuizeih Y.Q.Y., Tamov M.M.

Methods for selecting the mix composition
of self-compacting ultra-high-performance fiber-reinforced concrete

ЖИХАРЕВА К.А.

Применение технологии торкретирования
для строительства высотных зданий 12

Zhikhareva K.A.

Using shotcrete technology in high-rise construction

Тараканов О.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н.

Использование комплексных противоморозных добавок
при зимнем бетонировании 19

Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Moskvina R.N.

Use of complex antifreeze admixtures in winter concreting

ПРОИЗВОДСТВО БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ PRODUCTION OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

Белькова Н.А., Кузин Н.В.

Оптимизация составов конструкционного фибропенобетона
для изгибаемых элементов 23

Belkova N.A., Kuzin N.V.

Optimization of structural fibropene concrete compositions
for bendable elements

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES AND USE OF RECYCLED RAW MATERIALS

Иванова Т.А., Хатков С.А.

Классификация техногенных отходов,
используемых при производстве бетонных блоков 30

Ivanova T.A., Khatkov S.A.

Classification of technogenic waste used
in the production of concrete blocks

Махотлова М.Ш., Казиев В.М., Кокоев М.Н. Вторичное сырье в современном строительстве	34
Makhotlova M.Sh., Kaziev V.M., Kokoyev M.N. Secondary raw materials in modern construction	

Секисов А.Н. Эколого-экономическая эффективность рециклинга отходов в производстве бетона: мультикритериальный анализ ресурсосбережения и снижения выбросов CO ₂	40
Sekisov A.N. Ecological-economic efficiency of waste recycling in concrete production: multi-criteria analysis of resource saving and CO ₂ emission reduction	

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ИСПЫТАНИЕ
И ДИАГНОСТИКА БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ
QUALITY CONTROL, TESTING
AND DIAGNOSTICS OF CONCRETE PRODUCTS AND STRUCTURES**

Ками Килперик, Белькова Н.А., Шмитко Е.И. Исследование микроструктуры цементных систем в различных условиях эксплуатации (применительно к условиям Республики Бурунди)	47
Kami Kilperik, Belkova N.A., Shmitko E.I. Study of microstructure of modified cement systems in various operating conditions (in relation to the conditions of the Republic of Burundi)	

**СЫРЬЕ И КОМПОНЕНТЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА
RAW MATERIALS AND COMPONENTS IN CONCRETE TECHNOLOGY**

Афанасьева Я.В. Использование костробетона (hempcrete) как экологически чистого строительного материала	53
Afanasyeva Ya.V. Using hempcrete as an environmentally friendly building material	

Иванова Т.А., Ясницкий А.Б. Влияние химических добавок на смеси для изготовления торкретбетона	58
Ivanova T.A., Yasnitsky A.B. The influence of chemical additives on mixtures for the production of shotcrete	

Козлов П.Г., Таскин А.В., Федюк Р.С., Федотов Д.Р. Стандарты качества и экологическая безопасность геополимерных материалов: анализ текущих требований и перспектив применения	64
Kozlov P.G., Taskin A.V., Fedyuk R.S., Fedotov D.R. Quality standards and environmental safety of geopolymer materials: analysis of current requirements and application prospects	

Козлов П.Г., Таскин А.В., Федюк Р.С., Федотов Д.Р. Золошлаковые отходы как ресурс: анализ возможностей применения	69
Kozlov P.G., Taskin A.V., Fedyuk R.S., Fedotov D.R. Ash and slag waste as a resource: analysis of application possibilities	
Удодов С.А., Белов Ф.А., Самандасюк Г.В., Сусла А.А. Роль кавитационно активированного перлита в составе фосфогипсовых смесей для строительной 3D-печати	78
Udodov S.A., Belov F.A., Samandasyuk G.V., Susla A.A. The role of cavitationaly activated perlite in phosphogypsum mixtures for 3D construction printing	
Чернуха Д.Г., Иванов Г.В., Сорокин М.А. Бетоны с использованием Халактырского вулканического песка: инженерно-геологические особенности, свойства и перспективы применения	83
Chernukha D.G., Ivanov G.V., Sorokin M.A. Concretes using Khalaktyr volcanic sand: engineering and geological features, properties and application prospects	

ТОВАРНЫЕ БЕТОННЫЕ СМЕСИ И МОНОЛИТНОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ

COMMODITY CONCRETE MIXES AND MONOLITHIC CONCRETING

УДК 69.07

СПОСОБЫ ПОДБОРА СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫХ ФИБРОБЕТОНОВ



METHODS FOR SELECTING THE MIX COMPOSITION OF SELF-COMPACTING ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE

Абуizeiх Юсеф К.И.

аспирант,
кафедра строительных конструкций,
Кубанский государственный
технологический университет
Yousef.qasem1993@gmail.com

Тамов Мурат Мухамедович

кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры строительных конструкций,
Кубанский государственный
технологический университет
Yousef.qasem1993@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к подбору составов самоуплотняющихся сверхвысокопрочных фибробетонов (СВПБ). Приведены основные направления оптимизации составов, включающие эмпирические методы, модели плотной упаковки частиц, реологические и статистические подходы. Показаны их достоинства и ограничения при прогнозировании свойств и оптимизации составов СВПБ. Особое внимание уделено применению методов машинного обучения, позволяющих выявлять зависимости между свойствами компонентов и их пропорциями и характеристиками СВПБ, а также повышать точность прогнозов характеристик при минимизации объемов экспериментальных исследований. Представлены результаты, демонстрирующие эффективность алгоритмов случайных лесов, градиентного бустинга и нейронных сетей для прогнозирования прочности, подвижности и долговечности смесей. Сделан вывод о высокой перспективности интеграции технологий машинного обучения в процессы проектирования составов СВПБ.

Abuizeih Yousef Q.Y.

Postgraduate Student,
Department of Building Structures,
Kuban State Technological University
Yousef.qasem1993@gmail.com

Tamov Murat Mukhamedovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor
of the Department
of Building Structures,
Kuban State Technological University
Yousef.qasem1993@gmail.com

Annotation. The article examines approaches to the selection of compositions for self-compacting ultra-high-performance fiber-reinforced concretes (UHPFRC). The main directions for optimizing compositions are presented, including empirical methods, particle packing models, rheological, and statistical approaches. Their advantages and limitations in predicting properties and optimizing UHPFRC compositions are discussed. Particular attention is given to the use of machine learning methods, which make it possible to identify relationships between the properties of components, their proportions, and the characteristics of UHPFRC, as well as to improve the accuracy of property predictions while minimizing the volume of experimental testing. The study presents research results demonstrating the effectiveness of random forest, gradient boosting, and neural network algorithms for predicting strength, workability, and durability of mixtures. It concludes that integrating machine learning technologies into the design processes of UHPFRC compositions is highly promising.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон, фибробетон, оптимизация состава, прогнозирование свойств бетона, самоуплотняющийся бетон.

Keywords: ultra-high-performance concrete, fiber-reinforced concrete, mix design optimization, property prediction, self-compacting concrete.

Сверхвысокопрочный бетон (далее – СВПБ, англ. UHPC) является передовым инновационным материалом на цементной основе, сочетающим чрезвычайно высокие механические характеристики и долговечность [1]. Применение СВПБ целесообразно для изготовления конструкций, подверженных экстремальным нагрузкам и воздействию агрессивных сред. Высокая прочность СВПБ на сжатие и растяжение позволяет проектировать конструкции с меньшими размерами поперечных сечений и, следовательно, сокращать их материалоемкость, а в сочетании с повышенной долговечностью – также увеличивать срок службы сооружений [2].

Низкое водоцементное отношение (В/Ц) минимизирует пористость, благодаря чему прочность на сжатие у СВПБ примерно втрое выше, чем у обычного бетона. На прочность существенно влияют вид, пропорции и фракции заполнителей. При этом, в отличие от обычного тяжелого бетона, крупный заполнитель, как правило, в смесях СВПБ не применяют [3]. Составы СВПБ характеризуются повышенным содержанием цемента в сочетании с оптимизированными по размеру гранулами мелких заполнителей и минеральных добавок. Составы СВПБ чаще всего проектируют с включением фибр – они повышают прочность при растяжении, способность к поглощению энергии, ограничивают образование и раскрытие трещин.

Высокий расход цемента, применение минеральных и водоредуцирующих добавок, а также необходимость принудительного перемешивания смеси приводят к значительной дороговизне СВПБ. Поэтому вопросу оптимизации составов СВПБ уделяется большое внимание исследователей в области строительного материаловедения. Работа ведется в четырех направлениях: эмпирические методы, модели плотной упаковки матрицы бетона, методы подбора по реологическим свойствам и статистические методы [4].

Эмпирические методы подбора состава, по существу, представляют собой методы проб и ошибок, при которых соотношение компонентов корректируется на основе экспериментальных результатов. Такой подход позволяет напрямую оценить влияние количества и свойств отдельных компонентов на характеристики СВПБ, но требует значительных трудозатрат и материальных расходов [5].

Модели плотной упаковки матрицы (англ. *particle packing*) направлены на повышение прочности и долговечности СВПБ за счет оптимизации пространственного распределения твердых частиц – цемента, пуццолановых минеральных добавок и мелких заполнителей. Неточности этих моделей вытекают из принимаемой зачастую предпосылки о сферической форме частиц. Кроме того, такие модели не учитывают агломерацию мелких частиц и влияние фибр, влияющих на локальную микроструктуру материала [6].

Реологические методы сосредоточены на взаимосвязи между реологическими свойствами смеси и характеристиками затвердевшего бетона. Улучшение реологии достигается равномерным распределением частиц и более плотной их упаковкой. Для относительно простых систем СВПБ связь между реологией и характеристиками затвердевшего бетона достаточно надежна, однако теоретической базы, описывающей влияние фибр и высокоактивных минеральных добавок на подвижность смеси и конечные механические свойства, на сегодня нет [7].

Статистические методы исследователи используют для анализа экспериментальных данных и построения аналитических моделей, способных прогнозировать свойства СВПБ по их составу [8]. Такой подход обладает потенциальной возможностью значительного снижения количества необходимых серий испытаний. Однако точность подобных моделей напрямую зависит от качества и объема исходных данных. Ограниченный размах входных параметров снижает универсальность моделей и ограничивает области их применения. Дополнительную сложность создает то, что не все значимые факторы удается полноценно интегрировать в аналитические модели, особенно когда влияние отдельных переменных на свойства материала изучено недостаточно. При использовании новых видов минеральных добавок такие модели часто требуют серьезной переработки. Более того, ряд моделей опирается на показатели, которые невозможно напрямую измерить стандартными способами, что вынуждает прибегать к дополнительным вычислительным оценкам и допущениям, повышающим риск ошибок.

Все вышесказанное указывает на необходимость в более надежных инструментах для оптимизации составов СВПБ. Одним из таких инструментов может стать машинное обучение (МО). Основанное на статистических методах анализа данных, МО активно внедряется в различных областях материаловедения для прогнозирования свойств сложных многокомпонентных систем. Анализируя закономерности в обучающей выборке, модели МО выявляют зависимости между входными и выходными параметрами и могут прогнозировать результаты без детального погружения в приводящие к ним физические процессы. К настоящему времени накоплен значительный объем исследований, продемонстрировавших эффективность МО в оптимизации составов и прогнозировании свойств СВПБ. Исследователи применяют МО для системного анализа влияния характеристик компонентов на конечные свойства СВПБ, стремясь к упрощению базы исходных данных без снижения точности прогнозов [9].

Исследования показывают, что хорошо обученные модели МО могут обеспечивать высокую точность и устойчивость прогнозов, превосходя традиционные регрессионные модели. Кроме того, гибкость моделей МО позволяет их непрерывно совершенствовать и адаптировать к новым условиям. По мере накопления экспериментальных данных и результатов полевых испытаний эти модели можно обновлять и дорабатывать, повышая эффективность прогнозирования.

Обычно для прогнозирования прочности СВПБ на сжатие основными предикторами служат химический состав цемента и других вяжущих. В расчеты также включают максимальный размер заполнителя и расчетные показатели плотности упаковки. Дж. Абеллан-Гарсия [10] применил метод случайного леса с обучением по опытным данным, полученным по 931 составу СВПБ. Модель включала 17 входящих переменных: 13 массовых долей использованных компонентов, 3 отношения массовых долей и максимальный размер заполнителя. О.Р. Абуодех и др. [11], используя методы последовательного отбора признаков (SFS) и интерпретационной диаграммы нейросети (NID), выявили наиболее значимые компоненты смеси СВПБ: цемент, зола-уноса, микрокремнезем и вода. Построенная на их основе модель показала существенно более высокую точность прогнозирования по сравнению с использованием всех исходных восьми компонентов. В работе Р. Кумар и С. Раи [12] для прогнозирования прочности СВПБ на сжатие применены глубокие нейронные сети и ансамблевые алгоритмы машинного обучения по данным 810 составов с 15 входными параметрами. Эффективность и способность моделей к обобщению проверяли

с помощью различных показателей качества регрессий. Все алгоритмы показали высокую точность, при этом наилучшие результаты продемонстрировал метод Extra Trees и XGBoost.

Для прогнозирования подвижности смесей СВПБ используют аналогичные входные параметры, за исключением возраста образцов. В работе И. Цянь и др. [13] для моделей МО для прогнозирования удобоукладываемости СВПБ использованы алгоритмы дерева решения, бэггинг и градиентный бустинг, точность которых оценивали по коэффициенту детерминации, RMSE и MAPE. Садроссадат и др. [14] предложили процедуру многоцелевой оптимизации составов СВПБ с фибрами, отвечающей требованиям к прочности, подвижности и стоимости. Для построения высокоточных моделей использованы алгоритмы машинного обучения – искусственные нейронные сети и гауссовская регрессия процессов, а для поиска оптимальных смесей применен метод роя частиц. Сравнение с экспериментальными данными подтвердило эффективность подхода, позволяющего снизить объем испытаний и осуществлять поиск оптимальных составов СВПБ. В исследовании С. Махжоуби и др. [15] предложена автонастраиваемая обучающая система для прогнозирования прочности на сжатие и изгиб, удобоукладываемости и пористости СВПБ. Метод объединяет структурированные и неструктурированные данные, исключает аномалии с помощью изолированного леса и комбинированного анализа признаков, а также оптимизирует гиперпараметры моделей с использованием древовидного парзеновского оценщика и кросс-валидации. На основе этого подхода разработаны модели LightGBM, показавшие высокую точность оценки влияния параметров состава на свойства СВПБ.

Заключение

Проведенный анализ показал, что традиционные методы подбора составов сверхвысокопрочного бетона (СВПБ) обладают рядом ограничений, связанных с высокой трудоемкостью, затратностью и недостаточной универсальностью моделей. Применение методов машинного обучения открывает новые возможности для оптимизации составов СВПБ и прогнозирования их свойств с высокой точностью при минимизации экспериментальных испытаний. Наиболее эффективными показали себя алгоритмы случайных лесов, градиентного бустинга и нейронных сетей. Интеграция технологий машинного обучения в процессы проектирования СВПБ является перспективным направлением развития современного строительного материаловедения.

Литература / References

1. Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects / M. Amran [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. – 129029 p.
2. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review / R. Ullah [et al.] // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – № 12.
3. Rahmani E. A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) / E. Rahmani, K.K.M. Sharbatdar, M.H.A. Beygi // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 253. – P. 119–177.
4. Caijun Shi Mixture design methods for ultra-high-performance concrete – a review / M. Zhou [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2021. – Vol. 124.

5. Multi-scale design of ultra-high performance concrete (UHPC) composites with centropiasm theory / D. Fan [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2024. – Vol. 281. – P. 111–562.
6. Data driven design of ultra high performance concrete prospects and application / B.K. Aylas-Paredes [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15.
7. Teng L. Recent Advances in the Rheological Properties of Ultra-High-Performance Concrete: A Critical Review / L. Teng, K.H. Khayat, J. Liu // *Engineering*. – 2025.
8. Ghafari E. Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC / E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 55. – P. 17–25.
9. Machine-Learning-Based Comprehensive Properties Prediction and Mixture Design Optimization of Ultra-High-Performance Concrete / B.C. Sun [et al.] // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 21. DOI: 10.3390/su152115338
10. Abellán-García J. Study of nonlinear relationships between dosage mixture design and the compressive strength of UHPC // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 17. – P. e01228.
11. Abuodeh O. Prediction of compressive strength of ultra-high performance concrete using SFS and ANN / O. Abuodeh, J.A. Abdalla, R.A. Hawileh. – 2019. – P. 1–5.
12. Kumar R. A comparative study of prediction of compressive strength of ultra-high performance concrete using soft computing technique / R. Kumar, B. Raj, P. Samui // *Struct. Concr.* – 2023. – Vol. 24. – P. 5538–5555.
13. Advanced machine learning algorithms to evaluate the effects of the raw ingredients on flowability and compressive strength of ultra-high-performance concrete Y. Qian [et al.] // *PLoS ONE*. – 2022. – Vol. 17. – № 12. e0278161.
14. Multi-objective mixture design and optimisation of steel fiber reinforced UHPC using machine learning algorithms and metaheuristics / E. Sadrossadat [et al.] // *Eng. Comput.* – 2022. – Vol. 38. – P. 2569–2582.
15. Mahjoubi S. Auto-tune learning framework for prediction of flowability, mechanical properties, and porosity of ultra-high-performance concrete (UHPC) / S. Mahjoubi, W. Meng, Y. Bao // *Appl. Soft Comput.* – 2022. – Vol. 115. P. 108–182.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОРКРЕТИРОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ



USING SHOTCRETE TECHNOLOGY IN HIGH-RISE CONSTRUCTION

Жихарева Ксения Алексеевна

студентка,
Кубанский государственный аграрный университет
ksyushazhixareva0409@mail.ru

Научный руководитель

Иванова Татьяна Александровна

доцент,
кандидат технических наук,
Кубанский государственный аграрный университет
ksyushazhixareva0409@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается применение технологии торкретирования в строительстве высотных зданий. Торкретирование, или набрызг-бетона, используется для возведения и усиления несущих конструкций, ограждения котлованов и создания сложных архитектурных форм. Метод находит применение при реконструкции зданий, строительстве в стесненных городских условиях и решении сложных инженерных задач. Его преимущества заключаются в высокой скорости производства работ, возможности нанесения смеси на поверхности сложной конфигурации и минимальном воздействии на окружающую среду благодаря использованию малогабаритного оборудования. Несмотря на необходимость точного проектирования состава смеси и квалификации операторов, торкретирование позволяет сократить сроки строительства и снизить общие затраты, что делает его эффективным решением для современного высотного строительства.

Ключевые слова: торкретирование, набрызг-бетон, высотные здания, строительство, усиление конструкций, бетонные работы, торкрет-установка, торкрет-бетон.

Zhikhareva Ksenia Alekseevna

Student,
Kuban State Agrarian University
ksyushazhixareva0409@mail.ru

Scientific supervisor

Ivanova Tatyana Aleksandrovna

Associate Professor,
Candidate of Technical Sciences,
Kuban State Agrarian University
ksyushazhixareva0409@mail.ru

Annotation. This article discusses the application of shotcrete technology in the construction of high-rise buildings. Shotcrete, or spray-concrete, is used for the construction and reinforcement of load-bearing structures, the enclosure of excavations, and the creation of complex architectural forms. The method is used in the reconstruction of buildings, construction in cramped urban conditions, and solving complex engineering problems. Its advantages include high production speed, the ability to apply the mixture on surfaces of complex configuration, and minimal environmental impact due to the use of small-sized equipment. Despite the need for precise design of the mixture composition and operator qualifications, shotcrete allows for shorter construction times and lower overall costs, making it an effective solution for modern high-rise construction.

Keywords: tuckering, spray-concrete, high-rise buildings, construction, reinforcement of structures, concrete works, tuckering installation, tuckering concrete.

Технология торкретирования представляет собой современный метод нанесения бетонной смеси на поверхность строительных конструкций под воздействием сжатого воздуха. Этот процесс, также известный как набрызг-бетон, нашел широкое применение в строительстве высотных зданий благодаря своей эффективности и технологической гибкости. Особенность метода заключается в возможности формирования прочных бетонных покрытий на вертикальных и наклонных поверхностях, что особенно важно при работе с многоэтажными объектами сложной архитектурной формы. Использование торкретирования позволяет решать разнообразные задачи, связанные как с возве-

дением новых конструкций, так и с восстановлением и усилением существующих строительных элементов.

В современной строительной практике выделяют два основных способа торкретирования, каждый из которых имеет свои характерные особенности и области применения. Сухой метод выполнения работ основан на применении предварительно подготовленной сухой смеси, состоящей из цемента и различных заполнителей (рис. 1). Технологический процесс предполагает транспортировку этого сухого состава по специальному гибкому рукаву к месту производства работ с последующим увлажнением смеси непосредственно в момент ее выхода из сопла торкрет-установки. Данный подход демонстрирует существенные преимущества в достижении высокой производительности трудового процесса, что особенно важно при выполнении работ в сжатые сроки. Характерной особенностью сухого метода является возможность формирования покрытий значительной толщины за один технологический цикл, что значительно сокращает общее время на выполнение работ. Этот аспект приобретает особую актуальность при необходимости создания конструктивных элементов с повышенными требованиями к толщине и несущей способности. Одновременно с этим, рассматриваемый метод предъявляет повышенные требования к квалификации оператора, поскольку именно от его навыков зависит равномерность увлажнения смеси и, как следствие, конечное качество получаемой поверхности.

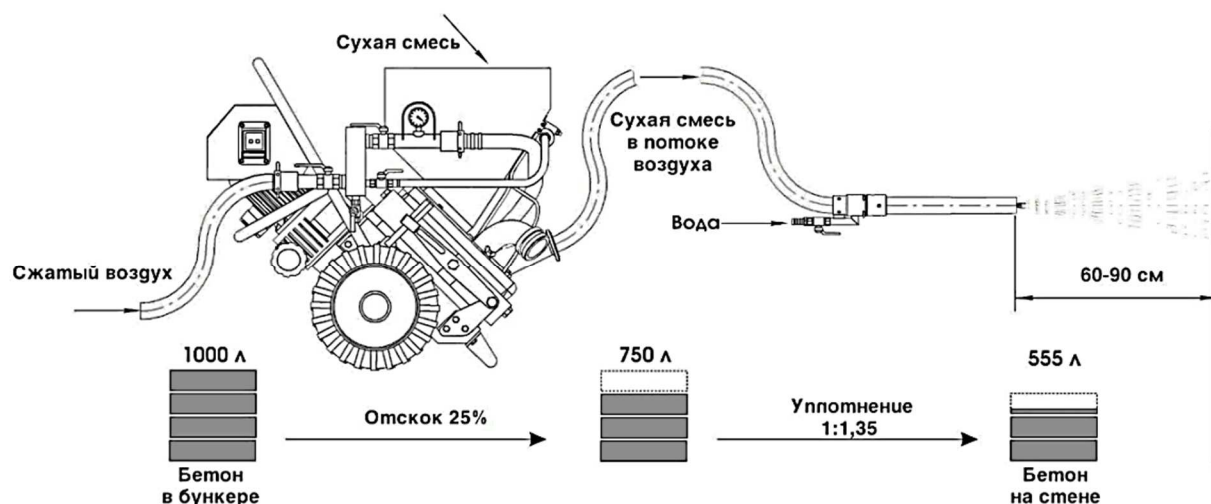


Рисунок 1 – Сухой способ торкретирования

Мокрый метод торкретирования принципиально отличается от сухого способа применениями готовой бетонной смеси, которая производится непосредственно перед началом работ или доставляется на строительную площадку с бетонного узла. Технологический процесс предполагает подачу полностью приготовленной и тщательно перемешанной бетонной композиции по герметичным рукавам высокого давления к специальному распыляющему устройству (рис. 2). На заключительном этапе происходит диспергирование смеси под воздействием сжатого воздуха, обеспечивающего равномерное распределение материала по обрабатываемой поверхности с заданными параметрами плотности и толщины.

Основным преимуществом мокрого торкретирования считается возможность обеспечения требуемого качества получаемого покрытия. Поскольку все компоненты бетонной смеси дозируются и перемешиваются изготовления бе-

тонной смеси и поэтому достигается высокая однородность состава и физико-механических характеристик наносимого материала. Это позволяет точно прогнозировать прочностные показатели, водонепроницаемость и морозостойкость создаваемого покрытия, что особенно важно для ответственных конструкций высотных зданий.

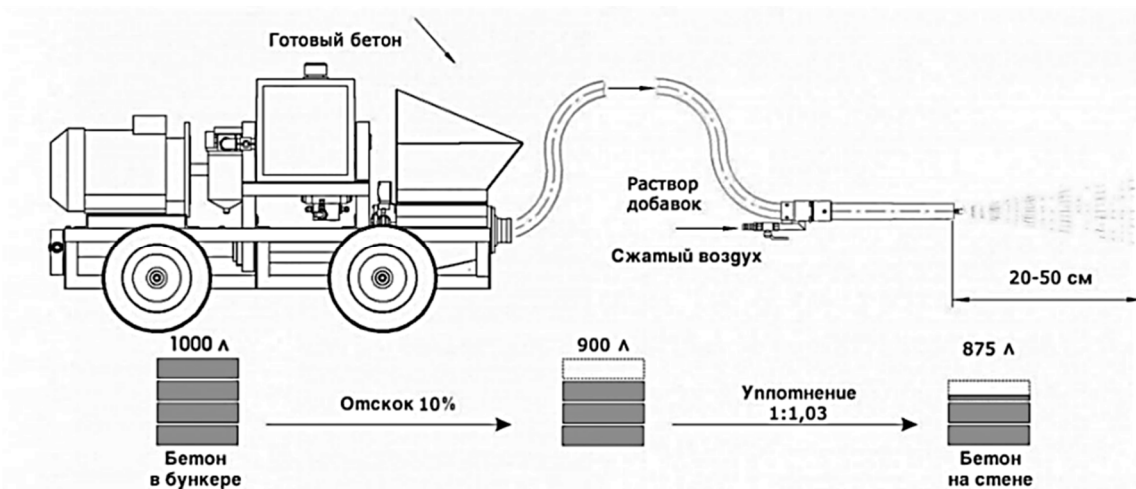


Рисунок 2 – Мокрый способ токретирования

Существенным ограничением технологии выступает сравнительно небольшая дальность транспортировки готовой смеси от торкрет-установки до обрабатываемой поверхности. Максимальное расстояние подачи обычно не превышает 100 метров по горизонтали и 20 метров по вертикали, что обусловлено значительным весом готовой бетонной смеси и возрастающим гидравлическим сопротивлением в транспортных рукавах [1]. Это требование обуславливает необходимость частого перебазирования оборудования при работе на протяженных участках или значительной высоте. Дополнительным технологическим нюансом является ограниченное время использования приготовленной смеси, которое обычно не превышает 90–120 минут с момента приготовления. Это связано с процессами схватывания цемента и требует тщательного планирования графика работ и организации бесперебойной доставки материалов. Однако данный метод обеспечивает минимальный процент отскока материала (не более 5–10 %) и позволяет создавать покрытия с улучшенными показателями пористости и однородности структуры. Применение мокрого токретирования особенно эффективно при выполнении работ в закрытых помещениях, где повышенная запыленность от сухого метода была бы недопустима. Технология демонстрирует высокие результаты при создании тонкостенных конструкций сложной конфигурации, где требуется точное воспроизведение проектных форм и плавных изгибов поверхностей. Метод успешно зарекомендовал себя при реконструкции и усилении железобетонных конструкций, где важным фактором является минимальное воздействие на существующие несущие элементы [2].

Технические характеристики торкретных установок накладывают определенные ограничения на размеры рабочей зоны. Особенно это касается мокрого способа токретирования, где значительный вес бетонной смеси в транспортных рукавах ограничивает длину подачи. При выполнении работ на высоте это обстоятельство требует разработки специальных инженерных решений по оптимальному размещению оборудования. Сухой метод токретирования характеризуется повышенной запыленностью рабочего пространства. В замкнутых объемах высотных зданий это создает дополнительные трудности и требует

применения эффективных систем вентиляции и индивидуальных средств защиты органов дыхания рабочих.

Качество выполнения торкретных работ в значительной степени зависит от тщательности подготовки обрабатываемых поверхностей. Подготовительный этап включает комплекс мероприятий по очистке основания от загрязнений, удалению слабого и поврежденного бетона, устранению следов коррозии металлических элементов. Арматурные каркасы подвергаются специальной обработке с использованием пескоструйного оборудования с последующим нанесением защитных грунтовочных составов. Степень подготовки поверхности непосредственно влияет на прочность сцепления торкрет-покрытия с усиливаемой конструкцией и определяет долговечность всего сооружения в целом.

Перспективным направлением является использование торкретбетона для создания тонкостенных конструкций сложной пространственной конфигурации. Современная архитектура высотных зданий часто включает криволинейные поверхности, арочные элементы, сводчатые конструкции и другие сложные геометрические формы, которые экономически нецелесообразно выполнять традиционными методами бетонирования с применением инвентарной опалубки. Технология послойного нанесения бетонной смеси на предварительно смонтированный арматурный каркас позволяет точно воспроизводить проектные очертания таких конструкций при обеспечении высоких прочностных характеристик.

В условиях плотной городской застройки торкретирование успешно применяется для устройства ограждений глубоких котлованов. Комбинированное использование торкретбетона с анкерными креплениями позволяет создавать надежные подпорные системы, обеспечивающие безопасное производство работ на всей глубине разработки грунта. Особенно эффективно зарекомендовала себя данная технология при возведении подземных частей зданий с использованием метода «стена в грунте», когда торкретное покрытие формирует постоянную конструкцию ограждения котлована [3].

Также торкретирование успешно используется для создания рекреационных зон в стилобатных частях высотного здания. При устройстве SPA-комплексов, бассейнов и других оздоровительных объектов технология позволяет формировать сложные криволинейные поверхности, ниши и архитектурные элементы, которые невозможно выполнить традиционными методами бетонирования (рис. 3). Такие решения оптимально сочетают эстетическую привлекательность с конструктивной надежностью и долговечностью в условиях повышенной влажности.



Рисунок 3 – Торкретирование стен бассейна [4]

Специфической областью применения торкретирования в высотном строительстве является усиление ядер жесткости – ключевых элементов каркаса, обеспечивающих общую устойчивость здания к действию горизонтальных нагрузок. Для решения этой задачи применяется сухой метод торкретирования с использованием высокопрочных бетонов класса В60 (рис. 4), позволяющий увеличить несущую способность конструкций без изменения их геометрических параметров. Все работы могут выполняться в стесненных условиях внутренних помещений без остановки эксплуатации здания, что особенно актуально при реконструкции существующих высотных объектов.



Рисунок 4 – Торкретирование стен высотного здания [5]

Среди значительных преимуществ технологии следует особо отметить возможность производства работ в условиях ограниченного пространства. Компактное оборудование для торкретирования может размещаться в местах, где использование крупногабаритной строительной техники невозможно по техническим или организационным причинам. Это качество особенно ценно при ведении строительства в исторически сложившихся районах городов с характерной плотной застройкой и узкими улицами, где размещение традиционных бетонных заводов и бетононасосов затруднено.

Высокая адгезионная способность торкретбетона к различным строительным материалам обеспечивает надежное соединение с усиливаемыми поверхностями. Бетонное покрытие, нанесенное методом торкретирования, демонстрирует повышенную стойкость к атмосферным воздействиям, значительным температурным перепадам и коррозионным процессам. Для верхних этажей высотных зданий, испытывающих максимальные ветровые нагрузки и температурные воздействия, это свойство имеет принципиальное значение для обеспечения долговечности конструкций.

Технология характеризуется высокой скоростью производства работ, что позволяет существенно сокращать общие сроки строительства. Минимальный объем подготовительных операций и земляных работ значительно уменьшает техногенное воздействие на окружающую среду, позволяя вести строительство в городских условиях без серьезных нарушений сложившейся инфраструктуры и жизнедеятельности района. Однако технология торкретирования имеет и

определенные ограничения. Существенным недостатком считается повышенный расход материала вследствие явления отскока части смеси от обрабатываемой поверхности. Величина потерь зависит от множества факторов: способа нанесения смеси, угла подачи раствора, качества подготовки поверхности и уровня квалификации оператора торкрет-установки. В высотном строительстве эта проблема усугубляется дополнительными сложностями организации подачи материалов на большую высоту.

Технические характеристики торкретных установок накладывают определенные ограничения на размеры рабочей зоны. Особенно это касается мокрого способа торкретирования, где значительный вес бетонной смеси в транспортных рукавах ограничивает длину подачи. При выполнении работ на высоте это обстоятельство требует разработки специальных инженерных решений по оптимальному размещению оборудования. Сухой метод торкретирования характеризуется повышенной запыленностью рабочего пространства. В замкнутых объемах высотных зданий это создает дополнительные трудности и требует применения эффективных систем вентиляции и индивидуальных средств защиты органов дыхания рабочих.

Таким образом, технология торкретирования представляет собой эффективное решение для современного высотного строительства, обладающее комплексом технологических преимуществ. Метод демонстрирует высокую результативность при выполнении разнообразных задач – от усиления несущих конструкций до создания сложных архитектурных форм. Широкие возможности применения технологии в стесненных условиях городской застройки, с минимальным воздействием на окружающую среду, делают торкретирование востребованным инструментом в арсенале строительных организаций. Сравнительный анализ двух основных методов торкретирования показывает их рациональную взаимодополняемость. Сухой метод обеспечивает высокую производительность и возможность создания покрытий значительной толщины, в то время как мокрый способ гарантирует стабильное качество бетонного покрытия и оптимален для работ в закрытых помещениях. Выбор конкретной технологии определяется особенностями проекта, условиями строительной площадки и требованиями к качеству выполняемых работ.

Литература

1. Иванова Т.А. Технологии торкретирования для строительства и реконструкции зданий и сооружений : монография. – Чебоксары, 2024. – 88 с.
2. Емельянова Т.А. Новый «старый» торкрет-бетон / Т.А. Емельянова, А.П. Денисова // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 10. – С. 55–57.
3. Лейер Д.В. Оптимизация методики расчета защитного сооружения на свайном основании, «обтекаемого» оползневыми глинистыми грунтами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 119. – С. 1200–1216. EDN WAFLAB.
4. Concrete Swimming Pool Construction: Methods and Techniques // Quantity Takeoff. – URL : <https://www.quantity-takeoff.com/concrete-swimming-pool-construction.htm> (дата обращения 23.10.2025).
5. Росторкрет. Усиление стен и пилонов. – Росторкрет, 2002. – URL : <https://rostorkret.ru/realizovannye-proekty/usilenie-sten-i-pilonov> (дата обращения 23.10.2025).

References

1. Ivanova T.A. Shotcrete technologies for the construction and reconstruction of buildings and structures : monograph. – Cheboksary, 2024. – 88 p.
2. Emelyanova T.A. New «old» shotcrete concrete / T.A. Emelyanova, A.P. Denisova // Industrial and civil engineering. – 2009. – № 10. – P. 55–57.
3. Leyer D.V. Optimization of the calculation method for a protective structure on a pile foundation, «streamlined» by landslide clay soils // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2016. – № 119. – P. 1200–1216. EDN WAFLAB.
4. Concrete Swimming Pool Construction: Methods and Techniques // Quantity Takeoff. – URL : <https://www.quantity-takeoff.com/concrete-swimming-pool-construction.htm> (date of application 23.10.2025).
5. Rostorkret. Strengthening walls and pylons. – Rostorkret, 2002. – URL : <https://rostorkret.ru/realizovannye-proekty/usilenie-sten-i-pilonov> (date of application 23.10.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОТИВОМОРОЗНЫХ ДОБАВОК ПРИ ЗИМНЕМ БЕТОНИРОВАНИИ



USE OF COMPLEX ANTIFREEZE ADMIXTURES IN WINTER CONCRETING

Тараканов Олег Вячеславович

доктор технических наук,
профессор,
декан факультета управление территориями,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
tarov60@mail.ru

Белякова Елена Александровна

кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры кадастр недвижимости и право,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
var_lena@mail.ru

Москвин Роман Николаевич

кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры
эксплуатация автомобильного транспорта,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
moskva_in@mail.ru

Аннотация. Показана возможность повышения эффективности производства бетонных работ в условиях отрицательных температур путем применения комплексных добавок. Определены механизмы действия супер- и гиперпластификаторов и их роль в составе комплексных добавок в отношении цементно-минеральных паст при достижении противоморозного эффекта.

Ключевые слова: суперпластификатор, минеральные наполнители, цементно-минеральные системы, противоморозные добавки, каменная мука, активные минеральные добавки.

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich

Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
Dean of the Faculty
of Territory Management,
Penza State University
of Architecture and Construction
tarov60@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor
of the Department
of Real Estate Cadastre and Law,
Penza State University
of Architecture and Construction
var_lena@mail.ru

Moskvin Roman Nikolaevich

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor
of the Department
of Motor Transport Operation,
Penza State University
of Architecture and Construction
moskva_in@mail.ru

Annotation. The Possibility of Improving Efficiency Concrete production in subzero temperatures using complex admixtures. The mechanisms of action of super- and hyperplasticizers and their role in complex admixtures for cement-mineral pastes in achieving an antifreeze effect were determined.

Keywords: superplasticizer, mineral fillers, cement-mineral systems, antifrosty additions, stone flour, active mineral additions.

Одним из наиболее распространенных способов повышения эффективности зимнего бетонирования является применение противоморозных добавок, понижающих температуру замерзания жидкой фазы бетонной смеси, обеспечивая тем самым возможность твердения бетона на морозе. Другим способом повышения эффективности зимнего бетонирования является применение водопонижающих добавок индивидуально или в комплексе с про-

тивоморозными компонентами, позволяющими снижать водосодержание смесей и создавать благоприятные условия для твердения бетона.

Комплексное применение противоморозных, пластифицирующих и минеральных добавок позволяет при рациональном проектировании гранулометрического состава бетона наиболее эффективно использовать механизмы их действия.

В настоящее время для получения высокотехнологичных бетонных смесей и качественных бетонов широкое распространение в качестве активных добавок, связывающих свободную гидролизную известь в гидросиликатные структуры, получили микрокремнеземы и некоторые другие модификаторы. Однако, как показывают исследования не только химическая активность минеральных добавок, может оказать существенное влияние на свойства бетонных смесей и бетонов, но и характер реологического поведения наполненных цементных систем в присутствии гипер- и суперпластификаторов.

Следует отметить, что характер разжижающего действия добавок весьма различен. Выполненные эксперименты показали, что цементные системы в большей степени разжижаются в присутствии гиперпластификаторов Melflux, в тоже время как водно-минеральные суспензии на основе гранитной каменной муки более пластифицируются в присутствии С-3. Одной из причин подобного поведения систем является различие зарядового состояния минеральных частиц. Поверхность полиминеральных частиц цемента заряжена мозаично, но в большей степени на ней локализованы положительно заряженные центры. Поверхность частиц молотого гранита на 40–50 % состоящая из микрочастиц кварца – заряжена соответственно отрицательно. Макромолекулы гиперпластификатора Melflux, имеющие значительно бóльшую молекулярную массу и разветвленную структурную цепь, адсорбируются на положительно заряженных частицах вяжущего, обеспечивая тем самым высокую пластификацию за счет электростатического и стерического эффектов.

Для суспензий на гранитной муке абсорбционная способность макромолекул гиперпластификатора и пластифицирующее влияние снижается вследствие одноименных зарядов поверхности и функциональных групп COO^- . Очевидно, что различное конформационное строение молекул и меньшая молекулярная масса С-3, способствует проявлению меньшего пластифицирующего влияния добавки (вследствие стерического и электростатического эффектов) на цементные суспензии и большего пластифицирующего действия на водно-минеральные системы на основе гранитной каменной муки (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние суперпластификатора С-3 на пластичность цементно-минеральных паст

Соотношение компонентов цементно-минеральных паст, %	Расплавы цементных, цементно-минеральных и минеральных паст, мм, в зависимости от содержания суперпластификатора С-3, %, от массы цементно-минеральных паст				
	0	0,25	0,50	0,75	1,00
Ц/КМ = 100/0	28	33	56	59	67
Ц/КМ = 90/10	28	47	60	71	68
Ц/КМ = 80/20	28	49	66	71	67
Ц/КМ = 60/40	28	49	68	71	67
Ц/КМ= 0/100	30	67	72	70	66

Примечание: Ц – Вольский ПЦ 500; КМ – каменная мука (гранит) $S_{уд} = 4400 \text{ см}^2/\text{г}$; водоцементное отношение цементных, цементно-минеральных и минеральных паст – 0,4.

Исследованиями [1] установлено, что пластифицирующая способность органических добавок в значительной степени зависит от строения и количества функциональных групп. Поэтому вполне логично проявление большего разжижающего влияния добавок на поликарбоксилатной основе, имеющих сильно разветвленную цепь. Молекулы таких гиперпластификаторов, адсорбируясь функциональными группами COO^- на положительно заряженных центрах, способствуют вследствие больших электростатических эффектов и большему разжижению цементных систем (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние гиперпластификатора Melflux на пластичность цементно-минеральных паст

Соотношение компонентов цементно-минеральных паст, %	Расплывы цементных, цементно-минеральных и минеральных паст, мм, в зависимости от содержания гиперпластификатора Melflux, %, от массы цементно-минеральных паст				
	0	0,25	0,50	0,75	1,00
Ц/КМ = 100/0	28	63	70	73	80
Ц/КМ = 90/10	28	64	65	75	77
Ц/КМ = 80/20	28	66	68	71	76
Ц/КМ = 60/40	28	63	70	70	71
Ц/КМ = 0/100	30	69	68	68	69

Примечание: Ц – Вольский ПЦ 500; КМ – каменная мука (гранит) $S_{уд} = 4400 \text{ см}^2/\text{г}$; водоцементное отношение цементных, цементно-минеральных и минеральных паст – 0,4.

Вместе с тем следует отметить, характер адсорбции незначительно влияет на пластифицирующее действие С-3 и добавок на поликарбоксилатной основе, поскольку оба пластификатора имеют в структуре ионизированные функциональные группы (SO_3^- и CO_2^-), обладающие отрицательным зарядом.

Очевидно, характер пластифицирующего действия в большей степени зависит от различного зарядового состояния поверхности цементных частиц и частиц каменной муки (гранита), а также от конформационного строения молекул. Разветвленные боковые цепи добавок на поликарбоксилатной основе могут способствовать изменению структуры адсорбционной воды, которая при высвобождении способствует повышению пластичности смесей.

Известно [1], что молекулы супер- и гиперпластификаторов при адсорбции на минеральных частицах и продуктах гидратации закрепляются функциональными группами и располагаются на поверхности частиц «плашмя», поэтому характер зарядового состояния поверхности (соотношение отрицательно и положительно заряженных активных центров) влияют на характер адсорбции, вследствие чего часть функциональных групп может оставаться свободными и улучшать смачиваемость частиц.

Значительно большая молекулярная масса гиперпластификаторов на поликарбоксилатной основе и, соответственно, большей протяженностью основной цепи, а также разветвленные боковые цепи, способствует появлению универсальных свойств подобных гиперпластификаторов, позволяющих практически равнозначно эффективно использовать их в растворах и бетонах на цементах различного химико-минералогического состава. Касаясь характера влияния поликарбоксилатных гиперпластификаторов на разжижаемость цементных систем с минеральными наполнителями, отметим, что в этом случае подобные добавки оказываются также более универсальными по сравнению с С-3 и начинают эффективно действовать уже при небольших дозировках, что подтверждается нашими исследованиями (табл. 2). Суперпластификаторы на основе С-3 в большей степени подвержены риску оказаться менее эффективными при изменении химико-минералогического состава цемента, минеральных

наполнителей, характера зарядового состояния поверхности минеральных частиц и т.д.

С этой точки зрения пластификаторы на основе С-3 в большинстве случаев обладают меньшим пластифицирующим влиянием на цементные системы.

В работе выполнены исследования, касающиеся характера пластификации не только чистых цементных систем, но и смесей цемента и каменной муки, полученной при дроблении и помоле гранита. В исследуемых составах количество каменной муки составляло 10, 20 и 40 % массы цемента. Установлено, что в большинстве случаев цементно-минеральные системы разжижаются значительно лучше, чем чисто цементные в присутствии обоих видов пластификаторов. Однако, для С-3 характерно резкое увеличение пластичности смесей на чистой каменной муке при дозировке до 0,25–0,35 % и также существенное повышение пластичности для смесей, содержащих 10, 20 и 40 % каменной муки при оптимальных дозировках 0,75 % от массы цемента (табл. 1). Характер влияния гиперпластификатора Melflux практически равнозначен как для чисто цементных систем, так и для смеси цемента и каменной муки, причем с увеличением дозировки добавки даже до 1 % пластифицирующее действие возрастает (табл. 2).

Исследования, выполненные на других наполнителях (песчаник, опока, диатомит) показали меньшее влияние на эффективность пластифицирующего действия суперпластификаторов С-3 и Melflux. На основании этого можно сделать вывод, что в качестве реологически активных наполнителей цементных систем наиболее целесообразным является применение плотных и прочных горных пород с низким водопоглощением.

Таким образом, при правильно подобранных компонентах комплексных добавок и их дозировках создается возможность проектирования составов бетона, способного при минимальных энергетических затратах, за счет оптимизации структуры, повышения эффективности противоморозных компонентов и, в целом, комплексной смеси, получать высокотехнологичные бетонные смеси и бетоны оптимальной структуры, способные при неблагоприятных климатических и производственных условиях обеспечивать высокие темпы твердения бетона и достигать высоких эксплуатационных качеств монолитных конструкций.

Литература

1. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1989.
2. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона / Тараканов О.В. [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – № 3(88). – С. 97–107.
3. Тараканов О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4(33). – С. 60–69.

References

1. Ratinov V.B. Concrete Additives / V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg. – 2nd edition, revised and expanded. – M. : Stroyizdat, 1989.
2. Expanding the database of complex organomineral additives in concrete technology / Tarakanov O.V. [et al.] // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2022. – № 3(88). – P. 97–107.
3. Tarakanov O.V. Formation of the microstructure of cement materials with mineral and complex additives / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // Regional Architecture and Construction. – 2017. – № 4(33). – P. 60–69.

ПРОИЗВОДСТВО БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

PRODUCTION OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

УДК 691.327.3

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОНСТРУКЦИОННОГО ФИБРОПЕНОБЕТОНА ДЛЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



OPTIMIZATION OF STRUCTURAL FIBROPENE CONCRETE COMPOSITIONS FOR BENDABLE ELEMENTS

Белькова Наталья Анатольевна

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии строительных
материалов, изделий и конструкций,
Воронежский государственный
технический университет
verlnata@mail.ru

Кузин Николай Владимирович

аспирант кафедры технологии строительных
материалов, изделий и конструкций,
Воронежский государственный
технический университет
kolia.cuzin2014@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены исследования, касающиеся оптимизации составов фибропенобетона по виду применяемого волокна. В ходе проведенных исследований были использованы следующие виды волокна: базальтовое, полиамидное, полиэфирное и полипропиленовое, характеризующиеся различными показателями модуля упругости. Установлено, что все виды армирующих волокон улучшают качество фибропенобетона.

Ключевые слова: фибропенобетон, армирующие волокна, модуль упругости, прочность при сжатии, коэффициент интенсивности напряжений.

Belkova Natalya Anatolyevna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
of the Department of Technology
of Building Materials,
Products and Structures,
Voronezh State Technical University
verlnata@mail.ru

Kuzin Nikolai Vladimirovich

Graduate Student of the Department
of Technology of Building Materials,
Products and Structures,
Voronezh State Technical University
kolia.cuzin2014@yandex.ru

Annotation. The paper presents studies regarding the optimization of fibropenobeton compositions by the type of fiber used. In the course of the studies, the following types of fiber were used: basalt, polyamide, polyester and polypropylene, characterized by various elastic modulus indicators. It has been found that all types of reinforcing fibers improve the quality of fibropene concrete.

Keywords: fiber foam concrete, reinforcing fibers, modulus of elasticity, compressive strength, stress intensity factor.

Актуальность проводимых исследований обусловлена решением проблемы комплексного использования в ограждающих, несущих, а также изгибающих элементах зданий неавтоклавных цементных поризованных бетонов. При этом одним из направлений по улучшению их качества является разработка составов фибропенобетонов, армированных волокном различного вида.

Исследования в этом направлении показали возможность использования фибропенобетонов для изготовления не только стеновых элементов с плотностью

до 600 кг/м³, но и перемычек и карнизных изделий с плотностью 700...900 кг/м³ и более [1–5].

Так, исследованиями А.И. Кудякова и А.Б. Стешенко [1] установлены закономерности влияния дисперсного армирования минеральными и синтетическими волокнами на прочность при сжатии, теплопроводность и величину усадочных деформаций цементного пенобетона марки D400.

А.А. Барановой и А.А. Бобровой [2] исследовалось влияние количества стальных, базальтовых и полипропиленовых фиброволокон на механические свойства теплоизоляционного пенобетона с добавкой микрокремнезема плотностью 500 кг/м³.

При этом, в качестве армирующих элементов использовались: базальтовая микрофибра, углеродные микроволокна, модифицированные фуллероидами, нанотрубками, астраленами и другими разновидностями аллотропических модификаций углерода [3].

Согласно исследованиям [5, 6] установлено, что введение в материал как полипропиленового, так и базальтового фиброволокна улучшается качество пенобетона, особенно по показателю величины влажностной усадки. При этом, базальтовое волокно, находясь в среде гидратирующего цемента, с течением времени теряет часть прочности. Полипропиленовые волокна равномерно распределяются по объему образца и обладают химической стойкостью.

В целом, можно сказать, что на величину основных свойств оказывают влияние: индивидуальные свойства фибры, предопределяемые ее вещественной природой (в частности, величины предельной растяжимости и модуля упругости) и длина фибры [7].

Что касается величины модуля упругости, то, согласно классификации, приведенной в работах [8–10] волокна, используемые для дисперсного армирования, можно классифицировать на два типа по показателю соответствия модуля упругости волокон и армируемой матрицы: низкоосновные и высокоосновные (табл. 1 [8–10]).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики волокон для дисперсного армирования бетона

Тип волокна	Плотность, кг/м ³	Прочность на растяжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %
<i>Низкомодульное волокно</i>				
1. Полипропиленовое	900	0,4–0,7	3,5–7	10–25
2. Полиамидное	1360	0,78	8,5	15
3. Нейлоновое	1100	0,77–0,84	4,2	16–20
4. Акриловое	1100	0,21–0,42	2,1	25–45
5. Полиэфирное	1400	0,73–0,78	8,4	11–13
6. Хлопковое	1500	0,42–0,7	4,9	3–10
<i>Высокомодульное волокно</i>				
7. Углеродное	2000	2,0	245	1
8. Асбестовое	2600	0,91–3,1	68–70	0,6
9. Стеклоанное	2600	1,05–3,85	70–80	1,5–3,5
10. Базальтовое	2600	3,0–3,2	80–110	1,4–3,6
11. Стальное	7800	0,80–3,15	200	3–4

Помимо выделенного показателя модуля упругости волокна необходимо учитывать и такие критерии, как прочность на растяжение, деформативность, химическая стойкость, адгезия к матрице, коэффициент линейного расширения. Если говорить о применяемом для армирования фиброволокне, то здесь чаще всего используется полимерное, стеклянное, углеродное и базальтовое волокна.

В проведенных ранее нами исследованиях [11–13] установлено, что введение фиброволокна различного типа и длины улучшают технические характеристики фибропенобетона. При этом оптимальные дозировки фибры находятся в пределах $1...2 \text{ кг/м}^3$ смеси.

Цель настоящих исследований являлась комплексная оценка влияния вида фиброволокна на свойства фибропенобетона.

В качестве объекта исследований принят фибропенобетон марки по плотности D1000. Для получения фибропенобетона использовались следующие материалы: цемент, песок, вода, фиброволокно, воздухововлекающая добавка. В качестве армирующего элемента использовалось волокно следующих типов: полиэфирное, полиамидное, базальтовое и полипропиленовое длиной 12 мм; расход принят 2 кг/м^3 смеси. Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие методики: прочностные характеристики образцов фибропенобетона оценивались на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982. Трещиностойкость бетона оценивалась по коэффициенту интенсивности напряжений (вязкость разрушения K_{Ic}), который определялся путем испытания специальных образцов-призм с надрезом, выполняющим роль инициатора развития магистральной трещины в образце при нагружении его по схеме трехточечного сосредоточенного изгиба.

На рисунках 1–3 приведены результаты проведенных исследований.

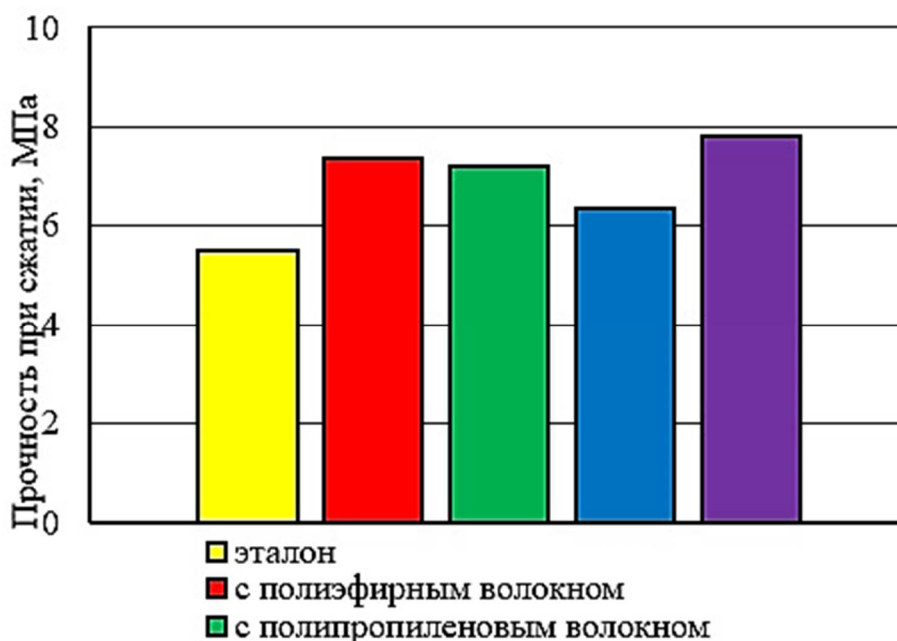


Рисунок 1 – Зависимость прочности при сжатии от вида фиброволокна

Как видно по полученным данным (рис. 1), введение фиброволокна повышает прочность при сжатии с 5,5 МПа (для эталона) до 6,35...7,8 МПа для образцов с различными видами волокон, то есть на 15...40 %. Это говорит об армирующем действии волокон, которые создают объемную сетку и препятствуют распространению трещин. Особенно это заметно для показателя прочности при изгибе (рис. 2).

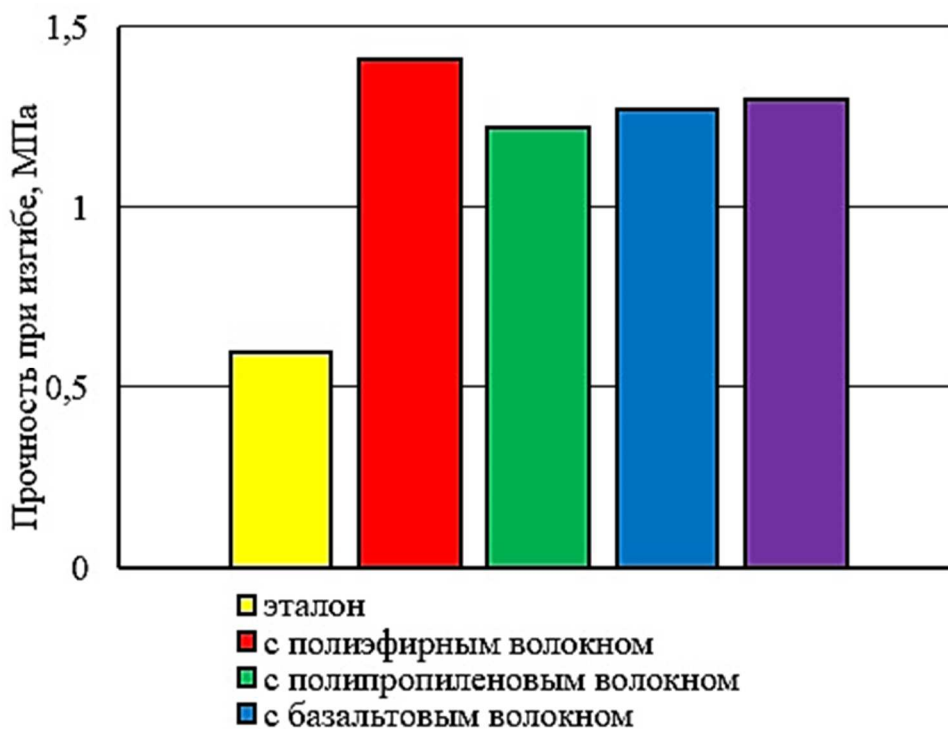


Рисунок 2 – Зависимость прочности при изгибе от вида фиброволокна

Согласно полученным данным, прочность при изгибе эталонного пенобетона составила – 0,6 МПа, для образцов с полиэфирным волокном – 1,41 МПа (это максимальное из полученных значений). Для образцов с полиамидным волокном (для которых характерно максимальное значение прочности при сжатии) этот показатель составил 1,22 МПа. Таким образом, повышение значения прочности при изгибе составило 2 и более раз. Проанализировав полученные данные с учетом характеристик использованного фиброволокна установлено, что максимальное значение модуля упругости соответствует базальтовому волокну (около 90 ГПа), при этом для фибропенобетона с этим волокно получены минимальные значения прочности при сжатии (6,35 МПа) и изгибе (1,22 МПа). Для остальных типов фиброволокна значения модуля упругости колеблются в пределах 3,5...8,5 ГПа, что в 10 раз меньше, чем у базальтового. При этом введение полимерных волокон значительно повышает основные характеристики бетона. Это можно объяснить тем, что базальтовое волокно, являясь по природе минеральным, разрушается по хрупкому типу и имеет меньшее сродство с пористой структурой фибропенобетона и создают менее плотную армирующую сетку.

Полимерные волокна, напротив, создают разветвленную армирующую сетку, которая разрушается по пластическому типу, что как раз и препятствует развитию и распространению трещин в структуре материала. Данные выкладки нашли свое отражение в результатах, представленных на рисунке 3. По полученным данным видно, что для фибропенобетона с базальтовым волокном значение коэффициента интенсивности напряжений минимально ($75 \text{ МН/м}^{3/2}$), хотя и выше, чем у неармированного пенобетона ($68 \text{ МН/м}^{3/2}$).

Среди фибропенобетона с полимерными волокнами максимальное значение коэффициента K_{Ic} равно $117 \text{ МН/м}^{3/2}$ (для полиэфирного волокна), минимальное – $83 \text{ МН/м}^{3/2}$ (для полипропиленового волокна). То есть явно прослеживается зависимость между типом волокон и механизмами разрушения фибропенобетонов.

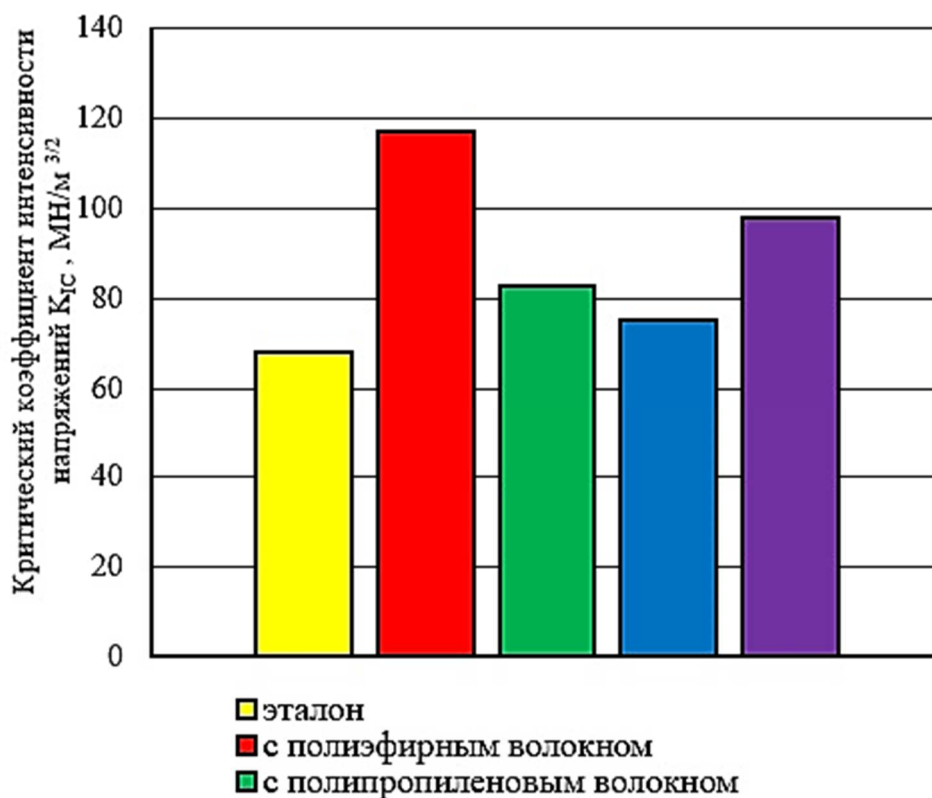


Рисунок 3 – Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений от вида фиброволокна

В целом можно сказать, что введение любого вида фиброволокна положительно влияет на качественные характеристики фибропенобетона. Лучшие показатели качества были получены для фибропенобетона с полиэфирным волокном. При этом для фибропенобетонных оптимальным видом волокон являются полимерные, которые можно отнести к низкомолекулярным.

Литература

1. Кудряков А.И. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения А.И./ Кудряков, А.Б. Стешенко // Вестник ТГСАУ. – 2014. – № 2. – С. 127–133.
2. Баранова А.А. Дисперсное армирование ячеистого и мелкозернистого бетонов на основе микрокремнезема / А.А. Баранова, А.А. Боброва // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 694–703.
3. Булярский С.В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение. – Ульяновск : ООО «Стрежень», 2011. – 478 с.
4. Моргун В.Н. Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами / В.Н. Моргун, Л.В. Моргун // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 50–54.
5. Суворов И.О. Влияние вида и количества армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 5(46). – С. 90–94.
6. Analysis of the synthetic fiber influence on the cement stone new formations composition in foam concrete / V. Morgun [et al.] // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1043. – P. 43–48.

7. Суворов И.О. Влияние вида и количества армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 5(46). – С. 90–94.
8. Рабинович Ф.Н. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов / Ф.Н. Рабинович, В.Н. Зуева, Л.В. Макеева // Стекло и керамика. – 2001. – № 12. – С. 29–32.
9. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. – М. : Издательство АСВ, 2011.
10. Войлоков И.А. Фибробетон история вопроса, нормативная база, проблемы и решения // Alitinform: цемент, бетон, сухие смеси. – 2009. – № 2. – С. 44–53.
11. Кузин Н.В. Экспертиза качества и оценка конкурентоспособности фибропенобетона для жилищного строительства / Н.В. Кузин, Н.А. Белькова // Актуальные вопросы инноваций и современные научные открытия: Сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции, Уфа, 25 апреля 2023 года. – Уфа : ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – Ч. 1. – С. 195–204. EDN CJXYKM.
12. Белькова Н.А. Фиброармированные пенобетоны неавтоклавно твердения на основе базальтовой и полиамидной фибр: основные характеристики / Н.А. Белькова, Е.И. Иващенко // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 2(51). – С. 97–104. DOI 10.24866/2227-6858/2022-2/97-104
13. Управление физико-механическими характеристиками неавтоклавно цементного поризованного бетона путем его микроармирования / Н.А. Белькова [и др.] // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2021. – № 2(47). – С. 82–90.

References

1. Kudyakov A.I. Foam concrete dispersed reinforced heat insulation of natural hardening / A.I. Kudyakov, A.B. Steshenko // Vestnik TSSAU. – 2014. – № 2. – P. 127–133.
2. Baranova A.A. Dispersed reinforcement of cellular and fine-grained concrete based on microsilica / A.A. Baranova, A.A. Bobrova // News of universities. Investments. Construction. Real estate. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 694–703.
3. Bulovsky S.V. Carbon nanotubes: technology, property management, application. – Ulyanovsk : Strezhen LLC, 2011. – 478 p.
4. Morgun V.N. Properties of foam concrete during their dispersed reinforcement with polypropylene and carbon fibers / V.N. Morgun, L.V. Morgun // Building materials. – 2022. – № 9. – P. 50–54.
5. Suvorov I.O. The influence of the type and amount of reinforcing fibers on the shrinkage deformations of fibropene concrete // Bulletin of Civil Engineers. – 2014. – № 5(46). – P. 90–94.
6. Analysis of the synthetic fiber influence on the cement stone new formations composition in foam concrete / V. Morgun [et al.] // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1043. – P. 43–48.
7. Suvorov I.O. The influence of the type and amount of reinforcing fibers on the shrinkage deformations of fibropene concrete // Bulletin of Civil Engineers. – 2014. – № 5(46). – P. 90–94.
8. Rabinovich F.N. Stability of basalt fibers in the environment of hydrating cements / F.N. Rabinovich, V.N. Zueva, L.V. Makeeva // Glass and ceramics. – 2001. – № 12. – P. 29–32.

9. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, structures. M. : DIA Publishing House, 2011.
10. Voylov I.A. Fibrobeton history of the issue, regulatory framework, problems and solutions // Alitinform: cement, concrete, dry mixtures. 2009. № 2. – P. 44–53.
11. Kuzin N.V. Quality examination and assessment of the competitiveness of fibropene concrete for housing / N.V. Kuzin, N.A. Belkova // Actual issues of innovation and modern scientific discoveries: Collection of scientific articles based on materials from the II International Scientific and Practical Conference, Ufa, April 25, 2023. – Ufa : Limited Liability Company «Scientific and Publishing Center «Bulletin of Science», 2023. – Part 1. – P. 195–204. EDN CJXYKM.
12. Belkova N.A. Fibro-reinforced non-autoclave hardened foam concrete based on basalt and polyamide fibers: main characteristics / N.A. Belkova, E.I. Ivashchenko // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. – 2022. – № 2(51). – P. 97–104. DOI 10.24866/2227-6858/2022-2/97-104.
13. Management of physical and mechanical characteristics of non-autoclave cement porous concrete by its micro-reinforcement / N.A. Belkov [et al.] // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. – 2021. – № 2(47). – P. 82–90.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES AND USE OF RECYCLED RAW MATERIALS

УДК 691.3

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННЫХ БЛОКОВ



CLASSIFICATION OF TECHNOGENIC WASTE USED IN THE PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS

Иванова Татьяна Александровна

кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры архитектуры,
Кубанский государственный аграрный университет
emelyanova-tanya@mail.ru

Хатков Самир Айдамирович

студент,
Кубанский государственный аграрный университет
khatkov03@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности применения промышленных и строительных отходов в технологии производства бетонных блоков. Проведён анализ существующих подходов к систематизации вторичных материалов и разработана классификация отходов по происхождению, агрегатному состоянию, функциональному назначению и экологической безопасности. Применение классификации позволяет обоснованно выбирать компоненты для получения лёгких бетонов с заданными свойствами и минимальным воздействием на окружающую среду.

Ключевые слова: техногенные отходы, классификация, вторичные ресурсы, переработка, экологичное строительство.

Ivanova Tatiana Alexandrovna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor
of Architecture Department,
Kuban State Agrarian University
emelyanova-tanya@mail.ru

Khatkov Samir Aidamirovich

Student,
Kuban State Agrarian University
khatkov03@mail.ru

Annotation. The article considers the use of industrial and construction waste in the production of lightweight concrete blocks. An analysis of existing approaches to the classification of secondary materials is presented, and a classification of waste is proposed according to origin, physical state, functional purpose, and environmental safety. The proposed classification allows for a rational selection of components for lightweight concrete with predetermined properties and minimal environmental impact.

Keywords: lightweight concrete, waste, classification, recycling, eco-friendly construction.

Рост объемов строительства в России привнес с собой повышение уровня жизни граждан, создание новых рабочих мест, но вместе с этим, происходит рост объёмов производства бетонных и железобетонных изделий, что привело к увеличению потребления природных ресурсов и образованию значительных объёмов отходов. Одним из современных и эффективных направлений является – использование промышленных и строительных отходов в технологиях производства лёгких бетонов. Однако, высокое разнообразие их видов и свойств влечет за собой необходимость в их классификации и научном обосновании.

Проблема ресурсосбережения и применения техногенных отходов в строительной отрасли является приоритетной задачей. Поэтому важно понимание их классификации при производстве бетонных блоков, с учётом их местоположения, физико-химических характеристик, функционального назначения и экологической безопасности

Вопросы использования отходов в строительстве рассматриваются в трудах многих отечественных и зарубежных исследователей [1–3]. Наиболее широко применяются золы и шлаки тепловых электростанций. К примеру, А.С. Ефременко и Е.П. Халтаева в своем труде приводят, что: «В России действуют 172 ТЭЦ. В их золошлакоотвалах накоплено свыше 1,5 млрд т отходов» [4]. Также используются доменные и сталеплавильные шлаки, дроблёный кирпичный и бетонный лом, стеклобой, а также отходы полимеров и резины [3].

Существующие классификации отходов, как правило, строятся по признаку происхождения отходов, а именно: энергетические, металлургические, строительные, бытовые. Здесь важно отметить, что при этом не всегда учитываются технологические особенности их применения, степень активности компонентов и экологические риски, а также недостаточно исследованы комбинированные отходы и их совместное использование в составе легких бетонов.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что актуальной задачей является формирование комплексной классификации отходов, ориентированной на практическое применение в технологии производства бетонов с применением отходов [5].

Для разработки классификации использовались литературные и нормативные источники [4, 6, 7], а также результаты лабораторных испытаний бетонов с различными видами заполнителей и добавок. При оценке свойств отходов учитывались следующие показатели: гранулометрический состав (по ГОСТ 8735-88); насыпная плотность и пористость; химическая активность и содержание вредных примесей; радиационно-гигиеническая оценка (по СанПиН 2.6.1.2800-10).

Таким образом, отходы были классифицированы по трем признакам, а именно: по происхождению (табл. 1), по агрегатному состоянию и назначению (табл. 2), и по экологической безопасности (табл. 3).

Таблица 1 – Классификация отходов по происхождению

Техногенные минеральные отходы	Золы, шлаки, пыль улавливания, микросилика, отходы горнодобычи. Применяются как активные минеральные добавки и мелкие заполнители
Строительные отходы	Дроблёный бетон, кирпичный бой, стеклобой. Используются в качестве крупного заполнителя
Органические и полимерные отходы	Пенополистирол, полиэтилентерефталат (ПЭТ), резиновые крошки, древесные отходы. Применяются для снижения плотности и теплопроводности блоков
Комбинированные отходы	Смеси минеральных и полимерных компонентов, обладающие комплексными свойствами

Таблица 2 – Классификация отходов по агрегатному состоянию и назначению

Критерий	Категория	Примеры отходов	Функциональная роль в бетоне
Твёрдые	Крупные заполнители	Дроблёный бетон, кирпичный бой	Обеспечивают прочность и структуру
Порошкообразные	Мелкие заполнители	Зола-унос, шлак, микросилика	Улучшают плотность и адгезию
Жидкие	Суспензии и шламы	Отходы цементных производств	Регулируют водоцементное отношение

Таблица 3 – Классификация отходов по экологической безопасности

Инертные отходы	Бетонный лом, кирпичный бой – не требуют дополнительной обработки
Условно безопасные	Золы, шлаки – нуждаются в контроле содержания тяжёлых металлов
Отходы, требующие стабилизации	Металлургические пыли, маслосодержащие шламы – могут применяться только после предварительной нейтрализации или термообработки

Таким образом, внедрение предложенной классификации способствует повышению эффективности использования отходов и развитию технологий экологически ориентированного строительства. Использование отходов различной природы позволит целенаправленно регулировать плотность, прочность и теплопроводность бетонов. Применение вторичных материалов обеспечивает снижение себестоимости изделий и уменьшение экологического воздействия производства. Однако существующая нормативная база недостаточно отражает специфику, и классификация техногенных отходов в производстве бетонов и бетонных смесей и является перспективным направлением развития отрасли.

Литература

1. Вторичные продукты в производстве строительных материалов / В.В. Шеховцов [и др.]. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – 152 с. ISBN 978-5-605-02454-5. EDN AZKARX
2. Токарева С.А. Утилизация крупнотоннажных отходов. Переработка, обезвреживание и получение полезной продукции / С.А. Токарева, М.К. Кабанова // Строительные материалы. – 2022. – № 5. – С. 25–29. DOI 10.31659/0585-430X-2022-802-5-25-29. EDN VBRHKP.
3. Язгельдиев Ш. Устойчивое использование строительных отходов: технологии и методы переработки / Ш. Язгельдиев, Т. Абаев, Б. Гурбанмырадов // Вестник науки. – 2024. – № 10(79). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-ispolzovanie-stroitelnyh-othodov-tehnologii-i-metody-pererabotki> (дата обращения 10.10.2025).
4. Ефременко А.С. Применение золошлаковых отходов ТЭС при производстве высокопрочных легких бетонов / А.С. Ефременко, Е.П. Халтаева // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 8(91). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-zoloshlakovyh-othodov-tes-pri-proizvodstve-vysokoprochnyh-legkih-betonov> (дата обращения 10.10.2025).
5. Голова Т.А. Комплексный подход к использованию отходов производств в изготовлении бетонов / Т.А. Голова, И.А. Магеррамова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2024. – № 3(96). – С. 34–42.
6. ГОСТ 25820-2021 Бетоны легкие. Технические условия.
7. Голова Т.А. Исследование композиционных вяжущих на основе фосфогипса для производства малых архитектурных форм / Т.А. Голова, А.Р. Давтян // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2016. – Т. 16. – № 9. – С. 97–100

References

1. Secondary products in the production of building materials / V.V. Shekhovtsov [et al.]. – Tomsk : Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2023. – 152 p. ISBN 978-5-605-02454-5. EDN AZKARX

2. Tokareva S.A. Disposal of large-tonnage waste. Processing, neutralization and obtaining useful products / S.A. Tokareva, M.K. Kabanova // Construction materials. – 2022. – № 5. – P. 25–29. DOI 10.31659/0585-430X-2022-802-5-25-29. EDN VBRHKP.
3. Yazgeldiev Sh. Sustainable use of construction waste: processing technologies and methods / Sh. Yazgeldiev, T. Abaev, B. Gurbanmyradov // Bulletin of science. – 2024. – № 10(79). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-ispolzovanie-stroitelnyh-otvodov-tehnologii-i-metody-pererabotki> (date of application 10.10.2025).
4. Efremenko A.S. Use of ash and slag waste from thermal power plants in the production of high-strength lightweight concrete / A.S. Efremenko, E.P. Khaltaeva // Bulletin of IrSTU. – 2014. – № 8(91). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-zoloshlakovyh-otvodov-tes-pri-proizvodstve-vysokoprochnyh-legkih-betonov> (a date of application 10.10.2025).
5. Golova T.A. Integrated Approach to the Use of Production Waste in Concrete Production / T.A. Golova, I.A. Magerramova // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2024. – № 3(96). – P. 34–42.
6. GOST 25820-2021 Lightweight Concretes. Specifications.
7. Golova T.A. Study of Composite Binders Based on Phosphogypsum for the Production of Small Architectural Forms / T.A. Golova, A.R. Davtyan // Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University. – 2016. – Vol. 16. – № 9. – P. 97–100.

ВТОРИЧНОЕ СЫРЬЕ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ



SECONDARY RAW MATERIALS IN MODERN CONSTRUCTION

Махотлова Маратина Шагировна

кандидат биологических наук,
академический советник РИА,
доцент кафедры землеустройство
и экспертиза недвижимости,
Кабардино-Балкарский государственный
аграрный университет имени В.М. Кокова
m.mahotlova@yandex.ru

Казиев Валерий Михайлович

кандидат экономических наук,
Ученый секретарь Кабардино-Балкарского
Регионального Отделения РИА,
Член корреспондент РИА,
доцент кафедры землеустройство
и экспертиза недвижимости,
Кабардино-Балкарский государственный
аграрный университет имени В.М. Кокова

Кокоев Мухамед Нургалиевич

доктор технических наук,
профессор,
генеральный директор АО «Каббалкагропромстрой»,
заслуженный строитель РФ,
академик РИА,
Кабардино-Балкарский государственный университет
имени Х.М. Бербекова

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме использования вторичных ресурсов и расширению области их применения в строительстве. Анализируется определение устойчивого строительства и основные принципы его реализации, включая экономические, социальные и экологические аспекты.

Ключевые слова: вторичное сырье, строительный мусор, вторичные ресурсы в строительстве.

Makhotlova Maratina Shagirovna

Candidate of Biological Sciences,
Academic Advisor to RIA,
Associate Professor
of the Department Land Management
and Real Estate Expertise,
Kabardino-Balkarian State Agrarian
University named after V.M. Kokov
m.mahotlova@yandex.ru

Kaziev Valery Mikhailovich

Candidate of Economic Sciences,
Scientific Secretary of the Kabardino-
Balkarian Regional branch
of the Russian Academy of Sciences,
Correspondent Member
of the Russian Academy of Sciences,
Associate Professor
of the Department Land Management
and Real Estate Expertise,
Kabardino-Balkarian State Agrarian
University named after V.M. Kokov

Kokoev Mukhamed Nurgalievich

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
General Director
of Kabbalkagropromstroy JSC,
Honored Builder of the Russian
Federation, Academician of RIA
Kabardino-Balkarian State University
named after H. M. Berbekov

Annotation. The article is devoted to the actual problem of the use of secondary resources and the expansion of their application in construction. The definition of sustainable construction and the basic principles of its implementation are analyzed, including economic, social and environmental aspects.

Keywords: secondary raw materials, construction waste, secondary resources in construction.

Современные условия развития строительной отрасли диктуют эффективное использование ресурсов и минимизацию отходов. При этом ежегодно в России накапливается около 70 миллионов тонн строительного мусора. И лишь четверть этого объема (около 17,5 миллионов тонн) отправляют на переработку.

Использование переработанных и вторично применяемых материалов становится нормой в современном строительстве.

Включение вторичных ресурсов в строительные проекты предполагает тщательный анализ их характеристик и соответствие нормативным требовани-

ям. Важно проводить испытания и сертификацию вторичного сырья, чтобы гарантировать его безопасность и пригодность для применения в строительстве. Развитие нормативной базы и стандартизация в этой области являются ключевыми факторами для широкого внедрения вторичных ресурсов в строительную практику [2].

Вовлечение вторичного сырья является ключевым звеном в экономике замкнутого цикла. Распоряжение № 2330-р принято в реализацию Федерального закона от 14 июля 2022 года № 268-ФЗ, так называемого закона о вторичных ресурсах, и вступило в силу с 01 января 2025 года. В распоряжении определена конкретная доля вторичного сырья в составе итоговой продукции, то есть процент массы вторичного сырья от общей массы готовой продукции. Новое требование направлено на повышение уровня вовлечения вторичного сырья в производстве.

Однако, эффективная реализация нового требования сталкивается с рядом существенных препятствий и вызовов.

Во-первых, существует проблема недостаточной развитости инфраструктуры сбора и переработки вторичного сырья. Не во всех регионах страны налажена система раздельного сбора отходов, а мощности перерабатывающих предприятий зачастую ограничены и не позволяют в полной мере утилизировать весь объем образующегося вторичного сырья.

Во-вторых, качество вторичного сырья не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к первичному сырью. Загрязненность, неоднородность состава и несоответствие определенным стандартам могут ограничивать возможности его использования в производстве. Это требует дополнительных затрат на очистку, сортировку и подготовку вторичного сырья, что повышает его себестоимость.

В-третьих, существует психологический барьер у производителей. Многие опасаются использовать вторичное сырье из-за стереотипов о его низком качестве и возможных негативных последствиях для репутации продукции. Необходима активная работа по информированию и убеждению производителей в безопасности и экономической эффективности использования вторичного сырья.

В-четвертых, остаются вопросы экономической целесообразности. В ряде случаев использование вторичного сырья может быть дороже использования первичного сырья, особенно с учетом затрат на логистику, переработку и подготовку. Необходимы экономические стимулы и механизмы поддержки, которые бы сделали его использование более привлекательным для производителей.

Наконец, для успешной реализации закона о вторичных ресурсах необходимо обеспечить четкий контроль и мониторинг за его исполнением. Важно разработать систему отчетности и проверки соответствия требованиям о доле вторичного сырья, а также предусмотреть меры ответственности за нарушение этих требований.

Кроме упомянутых проблем, необходимо также отметить, что государственная поддержка играет важную роль в стимулировании использования вторичных ресурсов в строительстве.

Государственная поддержка может способствовать продвижению преимуществ использования вторичных ресурсов в строительстве через следующие механизмы:

1. Субсидии и гранты. Предоставление субсидий и грантов предприятиям и организациям, которые внедряют технологии использования вторичных ре-

курсов в строительстве, может снизить затраты на их внедрение и стимулировать инновации.

2. Налоговые льготы. Введение налоговых льгот для компаний, использующих вторичные ресурсы, может сделать такой подход более привлекательным с экономической точки зрения.

3. Государственные заказы. Размещение государственных заказов на строительство с использованием вторичных ресурсов может создать спрос на такие материалы и стимулировать их производство.

4. Законодательные инициативы. Принятие законов и нормативных актов, регулирующих использование вторичных ресурсов в строительстве, может установить стандарты и требования, способствующие их применению.

5. Научно-исследовательские программы. Финансирование научно-исследовательских проектов по разработке новых технологий и материалов на основе вторичных ресурсов может ускорить их внедрение в строительство.

6. Создание инфраструктуры. Государственная поддержка в создании инфраструктуры для сбора, сортировки и переработки вторичных ресурсов может облегчить их доступ для строительных компаний.

7. Стимулирование кластерного развития. Поддержка создания кластеров предприятий, занимающихся переработкой вторичных ресурсов и производством строительных материалов на их основе, может способствовать развитию экосистемы инноваций в этой сфере.

Таким образом, комплексная государственная поддержка, охватывающая финансовые, законодательные, исследовательские, инфраструктурные и организационные меры, является важным фактором для успешного стимулирования использования вторичных ресурсов в строительстве. Она создает благоприятные условия для предприятий, снижает риски, формирует устойчивый спрос и способствует развитию инноваций, что в конечном итоге приводит к более устойчивому и ресурсоэффективному строительному сектору.

Необходимо также уделять внимание просвещению и информированию общества о преимуществах использования вторичных ресурсов в строительстве [3].

Просвещению и информированию общества о преимуществах использования вторичных ресурсов в строительстве может способствовать:

1. Образовательные программы и курсы. Введение специальных курсов в школах, университетах и профессиональных учебных заведениях, направленных на изучение преимуществ и технологий переработки отходов и использования вторичных ресурсов в строительстве.

2. Публичные лекции и семинары. Организация публичных лекций, семинаров и вебинаров с участием экспертов, где будут обсуждаться вопросы устойчивого строительства, преимущества использования вторичных ресурсов и инновационные решения.

3. Информационные кампании. Проведение информационных кампаний через СМИ, социальные сети и другие каналы коммуникации, направленных на повышение осведомленности населения о важности использования вторичных ресурсов и их преимуществах для окружающей среды и экономики.

4. Социальные проекты и акции. Организация социальных проектов и акций, направленных на популяризацию переработки отходов и использования вторичных ресурсов, таких как субботники, акции по сбору вторсырья и другие мероприятия.

5. Создание информационных материалов. Разработка и распространение информационных материалов, таких как буклеты, плакаты, видеоролики и

онлайн-ресурсы, которые будут рассказывать о преимуществах использования вторичных ресурсов в строительстве и способах их применения.

6. Партнерство с НКО (некоммерческой организацией) и общественными организациями. Взаимодействие с неправительственными организациями и общественными движениями, занимающимися вопросами экологии и устойчивого развития, для совместной работы над проектами по просвещению и информированию населения.

7. Использование цифровых технологий. Создание онлайн-платформ и приложений, где люди смогут получать информацию о переработке отходов, использовании вторичных ресурсов и способах участия в экологических инициативах.

8. Интеграция в школьные и университетские программы. Включение вопросов устойчивого строительства и использования вторичных ресурсов в учебные программы, что поможет формировать экологическое сознание у молодежи с раннего возраста.

9. Партнерство с бизнесом. Взаимодействие с компаниями и предприятиями, которые уже внедряют практики устойчивого строительства и переработки отходов, для проведения совместных образовательных мероприятий и информационных кампаний.

Таким образом, просвещение и информирование общества играют ключевую роль в формировании экологической культуры и поддержке устойчивого развития, что в конечном итоге способствует более широкому внедрению вторичных ресурсов в строительство и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Необходимо также активно развивать международное сотрудничество в области использования вторичных ресурсов в строительстве.

Международное сотрудничество может принимать различные формы, включая:

1. Обмен знаниями и технологиями. Участие в международных конференциях, семинарах и выставках, а также создание совместных исследовательских проектов и лабораторий с зарубежными партнерами для разработки и внедрения передовых технологий переработки отходов и строительных материалов на основе вторичного сырья.

2. Совместные проекты и программы. Реализация международных проектов и программ, направленных на развитие экологически устойчивого строительства, таких как проекты по обмену опытом в области использования переработанного бетона, стекла, пластика и других материалов.

3. Привлечение инвестиций и финансирования. Участие в международных инициативах и фондах, направленных на поддержку экологически устойчивого строительства, а также привлечение иностранных инвестиций для финансирования проектов по внедрению вторичных ресурсов в строительные процессы.

4. Гармонизация стандартов и норм. Разработка и внедрение международных стандартов и норм, регулирующих использование вторичных ресурсов в строительстве, что позволит обеспечить согласованность и совместимость технологий и материалов на глобальном уровне.

5. Обучение и повышение квалификации. Организация международных программ обучения и повышения квалификации для специалистов в области переработки отходов и использования вторичных ресурсов, что будет способствовать распространению знаний и опыта на национальном уровне.

Таким образом, международное сотрудничество в области использования вторичных ресурсов в строительстве является также важным элементом

стратегии устойчивого развития, позволяющим ускорить внедрение инновационных решений, повысить эффективность использования вторичного сырья и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Как мы видим, исходя из всего сказанного выше, применение вторичных ресурсов в строительстве решает несколько задач: экологическую, экономическую и техническую.

1. Экологическая задача связана с сокращением объемов отходов, направляемых на полигоны, и уменьшением негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду. Использование вторичных ресурсов позволяет сократить потребление первичного сырья, что в свою очередь снижает выбросы парниковых газов, энергозатраты и загрязнение воды и почвы.

Таким образом, для успешной реализации государственной политики по переходу к более экологически ответственным и ресурсосберегающим методам строительства, важно не только устанавливать обязательные требования, но и предоставлять предприятиям, перерабатывающим отходы и производящим строительные материалы из вторичного сырья, налоговые льготы и субсидии. Это создаст благоприятные условия для развития данной отрасли и привлечения инвестиций.

2. Экономическая выгода проявляется в снижении затрат на закупку строительных материалов. Вторичное сырье, как правило, дешевле первичного, что позволяет сократить себестоимость строительства. Кроме того, переработка отходов и их повторное использование стимулирует развитие новых отраслей экономики, создает рабочие места и способствует инновациям в сфере строительства.

Таким образом, интеграция вторичного сырья в строительную практику является ключевым элементом устойчивого экономического развития, способствующим оптимизации затрат и стимулированию инновационного потенциала. Данный подход способствует повышению эффективности использования ресурсов, снижению экологической нагрузки и улучшению качества строительной продукции.

3. В техническом аспекте вторичные ресурсы демонстрируют характеристики, сопоставимые, а в ряде случаев и превосходящие традиционные строительные материалы. Например, переработанный бетон демонстрирует повышенную прочность и долговечность, что подтверждается результатами многочисленных исследований в области материаловедения. Добавление вторичных полимеров в бетонные составы значительно улучшает их морозостойкость и водонепроницаемость благодаря модификации микроструктуры материала на молекулярном уровне, что способствует повышению эксплуатационных характеристик конструкций.

Эти технологические инновации позволяют создавать более надежные и устойчивые сооружения, минимизируя экологическую нагрузку и способствуя рациональному использованию природных ресурсов.

Применение вторичных материалов не только снижает углеродный след строительных проектов, но и способствует формированию замкнутого цикла производства, что является ключевым аспектом устойчивого развития строительной индустрии [1].

Таким образом, интеграция вторичных ресурсов в строительные технологии представляет собой перспективное направление, обеспечивающее долгосрочную устойчивость и экологическую безопасность.

В заключении хочется сказать, что использование переработанных и вторично применяемых материалов в строительстве становится все более важным

фактором устойчивого развития. Это позволяет не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить экономическую эффективность строительства и улучшить качество зданий. Дальнейшее развитие технологий переработки и стимулирование спроса на переработанные материалы будут способствовать дальнейшему распространению этого тренда и созданию более устойчивой строительной отрасли.

Литература

1. Бабаева Г.Б. Современные технологии строительства зданий из вторичного сырья / Г.Б. Бабаева, Д.И. Викал, А.Ю. Дьяченко // В сборнике: Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика. Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2023. – С. 198–202.
2. Фольц А. Современные тенденции использования вторичного сырья в строительстве. Экологическое значение, экономическая эффективность / А. Фольц; Отв. ред. С.А. Забелина // В сборнике: Молодая наука – 2021: Архитектура. Строительство. Дизайн. Филология. Сборник статей VIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции. – М., 2021. – С. 125–130.
3. Экономически и экологический анализ использования вторичного сырья при строительстве зданий и сооружений / К.Д. Якутис [и др.] // Финансовая экономика. – 2023. – № 5. – С. 215–216.

References

1. Babayeva G.B. Modern Technologies of Building from Recycled Materials / G.B. Babayeva, D.I. Vikol, A.Yu. Dyachenko // In the collection: Innovative Scientific Research in the Modern World: Theory, Methodology, and Practice. Collection of Scientific Articles based on the materials of the XII International Scientific and Practical Conference. – Ufa, 2023. – P. 198–202.
2. Folts A. Modern trends in the use of secondary raw materials in construction. Environmental significance and economic efficiency / A. Folts; Edited by S.A. Zabelina // In the collection: Young Science – 2021: Architecture. Construction. Design. Philology. Collection of articles from the VIII All-Russian Student Scientific and Practical Conference. – M., 2021. – P. 125–130.
3. Economic and Environmental Analysis of the Use of Secondary Raw Materials in the Construction of Buildings and Structures / K.D. Yakutis [et al.] // Financial Economics. – 2023. – № 5. – P. 215–216.

**ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА:
МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ
И СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO₂**



**ECOLOGICAL-ECONOMIC EFFICIENCY OF WASTE RECYCLING
IN CONCRETE PRODUCTION: MULTI-CRITERIA ANALYSIS
OF RESOURCE SAVING AND CO₂ EMISSION REDUCTION**

Секисов А.Н.

кандидат экономических наук,
доцент кафедры технологии,
организации, экономики строительства
и управления недвижимостью,
Кубанский государственный
технологический университет
alnikkss@gmail.com

Аннотация. На фоне ужесточения климатических нормативов и стремительного роста объемов строительных отходов вопросы декарбонизации бетона и ресурсосбережения приобретают стратегическую значимость. Применение рециклинга в портландцементных и низкоуглеродных вяжущих – от переработанных заполнителей (RCA) и бетонных заполнителей (RCA+) до обожженной глины (LC3), доменного шлака (GGBS), микрокремнезема, известково-известняковых композитов (LC), а также секвестрации CO₂ в карбонатах – способно принципиально трансформировать углеродный профиль отрасли. Цель исследования: исследовать эколого-экономические эффекты рециклинга отходов в технологиях бетона и выполнить мультикритериальный анализ с балансом между минимизацией CO₂, функциональным качеством и стоимостью. Нами разработана семантико-интеграционная модель «ЭкоМатерия» и индекс эколого-экономической эффективности (EcoEff), сочетающая ЛЦО-показатели (замыкающие 1–3 массы), критерии прочности, долговечности и стойкости, а также финансовые метрики NPV/IRR. База данных включает натурные и модельные результаты из работ 2021–2025 гг., включая карбонизацию, LC3, LCA оценки и материаловедческие исследования от ведущих авторов. В результате исследования нами показано, что карбонизированный RCFA (carbo-RCFA) и LC3-рецептуры обеспечивают наибольшее снижение удельных выбросов (до 45–55 %) при росте долговечности на 20–35 %. RCA+ и LC-композиты дают значительный ресурсосберегающий эффект (R = 0,85–0,92) и сопоставимые механические показатели; при этом LC3 демонстрирует наилучшую структурно-стабильную микроструктуру и нелинейное улучшение по кислотно-щелочным параметрам. Многоцелевая оптимизация с нисходящим профилированием весов приоритизирует LC3 и carbo-RCFA в трех сценариях,

Sekisov A.N.

Candidate of Economic Sciences,
Associate Professor
of the Department
of Technology, Organization,
Economics of Construction
and Real Estate Management,
Kuban State
Technological University,
alnikkss@gmail.com

Annotation. Against the backdrop of tightening climate regulations and the rapid growth of construction waste volumes, the decarbonization of concrete and resource conservation are acquiring strategic importance. The application of recycling in Portland cement and low-carbon binders – from recycled concrete aggregates (RCA) and advanced recycled concrete aggregates (RCA+) to calcined clay (LC3), ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume, limestone calcined clay composites (LC), as well as CO₂ sequestration in carbonates – has the potential to fundamentally transform the industry's carbon profile. The research aims to investigate the environmental and economic effects of waste recycling in concrete technologies and to perform a multi-criteria analysis balancing CO₂ minimization, functional quality, and cost. We have developed the «EcoMateria» semantic-integration model and an Eco-Efficiency Index (EcoEff), which combines life cycle assessment (LCA) indicators (mass flow for closing loops 1–3), criteria for strength, durability, and resistance, as well as financial metrics NPV/IRR. The database includes empirical and modeled results from studies published between 2021–2025, covering carbonation, LC3, LCA assessments, and materials science research from leading authors. Our results demonstrate that carbonated RCFA (carbo-RCFA) and LC3 formulations provide the highest reduction in specific emissions (up to 45–55 %) while increasing durability by 20–35 %. RCA+ and LC composites offer significant resource conservation benefits (R = 0.85–0.92) and comparable me-

в то время как LC занимает устойчивое второе место при жестких ограничениях на прочность. Выводом исследования заключается в том, что рециклинг отходов в бетоне – это не просто экологический декор, а системный рычаг трансформации потоков, стоимости и углеродного следа. Совместное применение карбонизационных технологий и LC3, дополненное RCA+ и LC-решениями, формирует мультиуровневую устойчивость: экологическую, технологическую и экономическую.

Ключевые слова: рециклинг отходов, бетон, карбонизация, LC3, LC, GGBS, RCA, устойчивость, ЛЦО, мультикритериальная оптимизация.

chanical properties; meanwhile, LC3 exhibits the best structurally stable microstructure and non-linear improvement in acid-alkali parameters. Multi-objective optimization with top-down weight profiling prioritizes LC3 and carbo-RCFA across three scenarios, while LC consistently ranks second under stringent strength constraints. The study concludes that waste recycling in concrete is not merely an environmental embellishment but a systemic lever for transforming material flows, cost, and carbon footprint. The combined application of carbonation technologies and LC3, supplemented by RCA+ and LC solutions, creates multi-level sustainability: environmental, technological, and economic.

Keywords: waste recycling, concrete, carbonation, LC3, LC, GGBS, RCA, sustainability, LCA, multi-criteria optimization.

Введение. Исторически экосистемы строительной отрасли организовывали свои материальные потоки по «модели линейного пользования», в которой природные ресурсы после жизненного цикла постройки конвертируются в инертные свалки, легирующие экологическую тень и увеличивающие экстернальные издержки. Ускоренная урбанизация, рост протяженности инфраструктурных контуров и глобальная напряженность по климатическим целям привели к неизбежной трансформации этого подхода в кольцевые, замкнутые контуры – от ритмо-циклического реставрирования до «триадного принципа» (reduce-reuse-recycle) в микроскопических превращениях геополлимерных фаз бетона. Современный бетонный термоинсталмент – это не только кристаллическая матрица портландцемента (C3S-C2S-C3A-C4AF), но и активно конфигурируемый композиционный материал, в который можно синтетически «вшивать» технологии карбонизации и высокоэффективные минералогические адаптеры. Именно здесь лежат причинно-следственные связи, обеспечивающие снижение углеродной интенсивности, сбережение природных наполнителей и энергоресурсов, а также адекватное поддержание эксплуатационной надежности.

Проблемное поле упирается в две полярные ограниченности. Первая – технологическая: традиционная технология OPC (Ordinary portland cement) демонстрирует карбонизационные потоки CO₂, отчисления от кальцинации известняка и сгорания топлива; вторая – организационно-экономическая: существующие цепочки поставок не создают достаточных стимулов для широкого внедрения рециклинга, особенно в условиях высоких «петрологических вариативностей» RCA, повышающих риск дисперсионного распада микроструктуры. На стыке этих полярностей возникает эколого-экономическая задача – найти устойчивый компромисс между минимизацией углеродного следа (LCA score 1-3), сохранением (или улучшением) прочности, морозостойкости, сульфатостойкости и долговечности, а также экономической оптимизацией стоимости, рисков, NPV/IRR.

Поэтому уместно сформулировать структуру дальнейшего рассмотрения, разворачивающую причинно-следственные связи. Сначала обосновывается актуальность рециклинга и декарбонизации, затем вводится методология мультикритериальной оценки (модель EcoMatter и индекс EcoEff), далее излагаются

материалы и методы, а после – результаты с таблицей и моделью, их интерпретация и обсуждение. Логическим завершением служат выводы, в которых обобщаются новые элементы научной новизны.

Материалы и методы. Экосистема материалов охватывает: (I) переработанные заполнители (RCA), в том числе более качественные бетонные заполнители (RCA+); (II) минерализованные связующие – LC3 (известняк + обожженная глина), LC (известняк + дополнительные карбонаты), GGBS (доменный шлак), микрокремнезем; (III) высокорреакционные порошки из фракции дробления бетона (RFA/RCFA) в «сыром» и карбонизированном состоянии (carbo-RCFA) – как простые, так и кремнеземистые – богатые кремнеземом SiO_2 (silica-rich). Важно, что карбонизация структурно реализует баланс: выветривание межпакетных напряжений, нативная «закрытие» пор, формирование наноразмерных кристаллов карбоната, способных консолидировать ксалин-основу и создавать прочную микро-«акрилатную» связку.

Методологически разработан двухступенчатый модуль.

1. Семантико-интеграционная модель «ЭкоМатерия» (EcoMatter), которая связывает материальные характеристики (PFA), операционные параметры (продолжительность карбонизации t_C , степень карбонатации αCO_2 , класс прочности), экологические индикаторы (удельная CO_2 интенсивность по score 1–3), и экономические показатели (себестоимость, CAPEX/OPEX, NPV/IRR). EcoMatter – это не просто имитация; это граф-алгоритм, где узлы – материальные фазы (CSH/Aft/CC/алюминаты/кремнезем), ребра – реакционные и технологические переходы, а веса – параметры эффективности (эко-интенсивность, прочность, долговечность, стоимость).

2. Индекс эколого-экономической эффективности $\text{EcoEff} = \sum w_i \cdot C_i$, где C_i – нормированные критерии. Используются четыре критерия: снижение удельных выбросов (E_{red}), сохраняемость/прирост прочности (S_σ), долговечность и химическая стойкость (D), стоимость и экономический эффект (Cost, NPV, IRR). Весовые профили менялись по сценариям: от равновесного (0,25/0,25/0,25/0,25) до про-экологического (0,45/0,20/0,20/0,15) и про-конструктивного (0,15/0,35/0,35/0,15).

База данных сформирована на основе модельных и экспериментальных результатов 2021–2025 годов, публикаций в журналах высшего квартиля, включая:

- карбонизационные технологии и поглощение CO_2 в бетоне [8, 10];
- низкоуглеродные связующие LC3 и технологии LC [1, 4];
- интеграция заполнителей и фракций бетона RCA/RCA+/RCA/RFA [2, 6];
- LCAs низкоуглеродных цементов и смесей [3];
- минералогические и технологические аспекты карбонизации и гидратации [5];
- экологическая эффективность бетонной системы в рециклинге [7];
- низкоуглеродные стратегии в цементной индустрии и секвестрация [9].

Процедурно выполнено компьютерное моделирование композиций и профилирование параметров (t_C , αCO_2 , соотношения связующих в LC3/LC/GGBFS/MS), интегрированное с «коробкой» (box) ограничений: класс прочности C30-C60, морозостойкость F300-F600, относительно низкая проницаемость, приемлемые диапазоны pH и SO_4^{2-} – стойкости.

Результаты. Ниже представлена таблица 1 сводных результатов для базовых 12 технологических модулей рециклинга. В ней указаны средние доли вовлеченных отходов, оценочные изменения прочности (относительно OPC), ожидаемые величины секвестрации CO_2 , суммарная эколого-экономическая эффективность (EcoEff), а также риск-фактор (легкая оценка технологической приемлемости и организационного масштабирования).

Таблица 1 – Сводная оценка технологических модулей рециклинга в бетоне

Технологический модуль	Доля отходов, %	$\Delta\sigma$, %	CO ₂ -поглощение, кг/т.бетон	EcoEff (норм.)	Риск-фактор (низкий-высокий)
1. OPC-база (референс)	0	0	0	0,00	Низкий
2. RCA (50 % coarse)	50	-5	0	0,21	Средний
3. RCA+ (65 % coarse + 15 % fine)	80	-3	0	0,30	Средний
4. GGBS (50 %)	50	+2	0	0,45	Низкий
5. GGBS (70 %)	70	+4	0	0,38	Средний
6. Микрокремнезем (10 %)	10	+6	0	0,34	Низкий
7. LC (60 % binder)	60	-2	0	0,50	Низкий
8. LC3 (60 % binder)	60	+6	0	0,64	Низкий
8. RFA (30 %)	30	-2	0	0,32	Средний
9. Carbo-RCFA (30 % + карбонизация 2 ч)	30	+2	15	0,71	Средний
10. Carbo-RCFA (50 % + карбонизация 4 ч)	50	+1	25	0,67	Высокий
11. LC3 + carbo-RCFA (30 % RCFA + 30 % LC3)	60	+5	15	0,78	Средний

Примечание: $\Delta\sigma$ – относительное изменение прочности на сжатие к 28 суткам; CO₂ – поглощение – оценочная величина секвестрации в процессе карбонизации из расчета 0,15–0,22 кг CO₂/кг минерализованного минерала при заданных tC и α CO₂ [5, 8, 10]. EcoEff – нормированный индекс (0–1) для равновесного сценария (wE = wS = wD = wC = 0,25). Риск-фактор – качественная интегральная оценка технологической и организационной приемлемости.

Как видно из таблицы 1, наилучшие показатели EcoEff демонстрируют комбинированные решения с LC3 и карбонизированными фракциями RCFA: LC3+carbo-RCFA и carbo-RCFA (30 %) выделяются за счет высокого CO₂-поглощения и стабильного прироста механических свойств, а LC3 без карбонизации – за счет однородности микроструктуры, уменьшения портландитовой компоненты и плотности гидратационных фаз. LC (60 %) показывает сильную экономическую составляющую, в то время как GGBS-композиции обеспечивают отличную базовую базу прочности и умеренную декарбонизацию. RCA+ сохраняет приемлемую прочность и значительно снижает спрос на природные заполнители.

Для прояснения влияния веса критериев на результат оптимизации, представлена таблица 2.

Таблица 2 – Мультикритериальная оценка EcoEff для приоритетных модулей

Модуль	wE = 0,45, wS = 0,20, wD = 0,20, wC = 0,15	wE = 0,25, wS = 0,25, wD = 0,25, wC = 0,25	wE = 0,15, wS = 0,35, wD = 0,35, wC = 0,15
LC3	0,66	0,64	0,60
LC	0,52	0,50	0,48
GGBS (50 %)	0,45	0,45	0,47
Микрокремнезем (10 %)	0,36	0,34	0,33
Carbo-RCFA (30 %)	0,73	0,71	0,65
Carbo-RCFA (50 %)	0,69	0,67	0,61
LC3+carbo-RCFA	0,80	0,78	0,71
RCA+	0,31	0,30	0,28

В рамках модели «ЭкоМатерия» значимая роль принадлежит минералогическим превращениям. Ниже представлена модельная конфигурация связей между основными фазами и параметрами эффективности (схематично – с использованием числовых коэффициентов влияния для наглядности) – таблица 3.

Таблица 3 – Модельные коэффициенты влияния ($\Delta\Psi$) между фазами и критериями эффективности

Пара (влияет → на)	$\Delta\Psi$ по E_{red}	$\Delta\Psi$ по S_σ	$\Delta\Psi$ по D	$\Delta\Psi$ по $Cost$
LC3 → CSH-уплотнение	+0,28	+0,18	+0,22	-0,05
LC3 → замещение портландита	+0,20	+0,14	+0,18	-0,03
GGBS → C-S-H и C-A-S-H	+0,12	+0,20	+0,16	+0,02
Микрокремнезем → наноуплотнение	+0,08	+0,22	+0,20	+0,05
Carbo-процесс (tC , αCO_2) → CC-нанофаза	+0,35	+0,06	+0,28	+0,01
RCA+ → дисперсия пор/морфология	+0,06	-0,02	+0,05	-0,08
RFA → портландит/гидратация	+0,05	-0,01	+0,04	-0,02

Смысл коэффициентов – оценочная интенсивность эффекта на нормализованные критерии (от -1 до +1) при переходе от «уровня 0» (ОП) к «уровню 1» (внедрение данной подсистемы). Они не линейны, а отражают нелинейные зависимости, подтвержденные материалами и численными исследованиями [1, 5, 8, 10].

В анализе достигается причинно-следственная связка: (I) LC3 повышает плотность CSH-матрицы, сокращает портландитовую «слабую» зону и перераспределяет C-S-H по фрактальной размерности; (II) карбонизация заполняет поровые «лакуны» кальцитовыми/аргонитовыми нанотопологиями и создает когерентные интерфейсы со стабильными алюминатными и сульфатными фазами; (III) RCA+ обеспечивает рост циркулярности, но требует повышенного технологического контроля за микротрещинами; (IV) GGBS и микрокремнезем улучшают долговременную морфологию, а микрокремнезем – резко повышает начальную и раннюю прочность.

Результаты показывают следующие ключевые инсайты.

1. LC3 и carbo-RCFA – оба устойчиво поднимаются на вершину мультикритериального ранжирования; LC3 особенно хорош для сбалансированных режимов, carbo-RCFA – для про-экологических сценариев с высокой приоритетностью углеродной компоненты.

2. Комбинированный модуль LC3+carbo-RCFA формирует синергию: минералогическая настройка (кальций–алюминий–силикатные сети) укладывается в когерентные контуры карбонизационного «плетения», давая максимальный суммарный эффект.

3. Односторонний акцент на RCA (высокая доля) без технологической балансировки (как RCA+) приводит к статистически значимому снижению прочности; это снижает приоритет при строгих требованиях по S_σ/D .

4. GGBS-композиции остаются «рабочей лошадкой» для долговременной долговечности и устойчивой прочности; их экологический эффект умерен, но стратегически важен для секторов с длительным жизненным циклом.

Обсуждение. Ужесточение климатических режимов, возросшая публичность оценок LCA и международная повестка по циркулярности – не внешние контексты, а встраиваемые механики изменения технологических и экономических параметров [9, 11]. В этой рамке рециклинг бетонных отходов становится не просто экологическим актом, а фундаментальным регулятором углеродного

риска. Карбонизация – инструмент, который решает не только экологическую задачу (поглощение CO_2), но и материаловедческую: уменьшение пористости, стабилизация алюминатных фаз, контролируемый pH-профиль, снижение микротрещинообразования [8, 10]. LC3 – это «умная» корректирующая конфигурация, в которой карбонаты и обожженная глина взаимно усиливают кинетику гидратации и морфологию C-S-H, что приводит к комплексной устойчивости [1, 4].

Критически важно осознать границы применимости. Для carbo-RCFA (30–50 %) время карбонизации и степень карбонизации влияют на ряд свойств: при избыточной карбонизации возможно локальное падение щелочности и появление фаз, вызывающих сорбцию ионов Cl^- с последующим окислением; это снижает антикоррозионную стойкость. В избыточных долях RCA+ (выше ~65 % coarse) возможны эффекты старческого старения структуры (щелочность интерфейсов, микро-прокисание), что особенно критично для бетонов с предрасположенностью к карбонизации и хлоридной индуцированной коррозии [2, 6]. Внедрение LC3 уменьшает портландитовую фракцию, стабилизируя pH и снижая риск последующих щелочно-карбонатных реакций [1].

Организационно-экономическая часть показывает, что мультиуровневое масштабирование возможно через пилотные кластеры (3–5 промышленных площадок) с контролируемой «лабораторно-производственной» связкой: RCA+/RFA обогащение → LC3-композиция → карбонизация. CAPEX для карбонизации (смесительная, транспортирование, контроль среды) компенсируется OPEX-сбережениями на сырье и снижении платежей за CO_2 ; модель NPV/IRR у LC3 и carbo-RCFA устойчива при прогнозной ставке 8–10 % и уровне внедрения ≥ 30 % от объема при производстве C35-C45 [3, 7]. Важный методологический момент: оценка LCA scope 1–3 по рециклинговым потокам (RCA/RCA+/RFA) должна проводиться по-блочно: природные ресурсы (заполнители), энергия/топливо, материалы (связующие), транспорт/логистика, на строящейся площадке – с учетом специфики проектов (город/периферия, сервисные тоннели vs. панельные здания).

Причинно-следственные связи демонстрируют.

1. Понижение портландита (LC3) и рост наноразмерной карбонизированной фазы (carbo-RCFA) приводят к повышению уплотнения C-S-H, что уменьшает диффузионную проницаемость, повышает морозостойкость и снижает кинетику коррозии арматуры [1, 5].

2. Увеличивается доля вторичных материалов в геомеханике бетона (взамен первичных ресурсов), и, тем самым, снижается совокупный экстернальный углеродный след на килограмм бетона [3, 7].

3. Экономически увеличивается удельная «капитализация» углеродной единицы: каждая килограмм-секвестрированного CO_2 переводится в стоимость за счет продаж на углеродном рынке и сокращения платежей по штрафам/лимитам (в зависимости от юрисдикции) [9, 10].

Таким образом, развитие рассматриваемой сферы – не вопрос «дополнения» к традиционной технологии, а модульная реструктуризация «области возможности»: технологическая – через LC3 и карбонизацию, экологическая – через снижение карбонатных потоков и углеродного интенсификации, экономическая – через управляемую циркулярность и структурированную оптимизацию NPV/IRR. Перспективы – от наномодулирования до масштабированных пилотных проектов, где экологическая и экономическая эффективности соединяются в общий «индекс устойчивости», а риски (технологические, организационные) минимизируются через управляемые сценарии внедрения и «смарт-карбонный» контроль.

Заключение. В данном исследовании обоснована теоретическая и практическая актуальность рециклинга отходов в бетоне и выполнен системный

анализ его эколого-экономической эффективности. Установлено, что LC3 и carbo-RCFA обеспечивают наибольший мультикритериальный эффект: LC3 – через структурное уплотнение CSH и стабилизацию микрофазы, carbo-RCFA – через карбонизационную секвестрацию и снижение пористости. RCA+ и LC-композиции дополняют картину, придавая ей ресурсосберегающий и экономический контекст. Внедрение комбинированных решений, таких как LC3+carbo-RCFA, дает синергию, которая нелинейно превосходит суммарные эффекты отдельных компонентов.

Методологический вклад выражен в разработке модели «ЭкоМатерия» и индекса EcoEff, позволяющих численно сопоставлять экологические, конструктивные и экономические критерии для масштабируемых технологических модулей. Практический вклад – в формировании набора приоритетных сценариев (LC3, carbo-RCFA, LC3+carbo-RCFA), рекомендуемых к пилотной интеграции в индустриальные производственные цепочки с соответствующим экономическим обоснованием и управлением рисками.

Литература / References

1. Calcined clay limestone cements (LC 3). Cement and Concrete Research / Karen Scrivener [et al.]. – 2017. 114. DOI 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
2. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review / Caijun Shi [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 112. P. 466–472.
3. A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches. City and Built Environment / Guohao Wang [et al.]. – 2024. – № 2. – 12 p. DOI 10.1007/s44213-024-00036-1
4. Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay. Case Studies in Construction Materials / Hu, Yuchen [et al.]. – 2024. – № 20. – P. e03283. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03283>.
5. Liu Zhuo. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites / Liu Zhuo & Meng Weina // Journal of CO₂ Utilization. – 2020. 44. DOI 10.1016/j.jcou.2020.101428
6. Durability performance of concrete incorporating carbonated recycled coarse aggregates: a review. npj Mater. Sustain / Z. Zhang [et al.]. – 2025. – № 3. – 27 p. – URL : <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00071-x>
7. Marsh Alastair. Circular economy strategies for concrete: Implementation and integration / Marsh Alastair & Velenturf Anne & Bernal Susan // Journal of Cleaner Production. – 2022. – № 362. – 132486 p. DOI 10.1016/j.jclepro.2022.132486
8. Development, synthesis, classification and characterization techniques of geopolymers cement – a review / Edith Cherotich [et al.] // Mediterranean Journal of Chemistry. – 2025. – № 15. – P. 140–161. DOI 10.13171/mjc02504051808cherotich
9. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry / Emad Benhelal [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2013. – № 51. – P. 142–161. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.10.049
10. Carbon sequestration and utilization in cement-based materials and potential impacts on durability of structural concrete. Construction and Building Materials / Dan Meng [et al.]. – 2022. – 361 p. 129610. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129610
11. Implementation of investment and construction projects as part of the interior image formation / S. Ovchinnikova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020, Novosibirsk, September 22–24, 2020. – Bristol : IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 953. – P. 012082. DOI 10.1088/1757-899X/953/1/012082. EDN HLYAWN

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ИСПЫТАНИЕ И ДИАГНОСТИКА БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

QUALITY CONTROL, TESTING AND DIAGNOSTICS OF CONCRETE PRODUCTS AND STRUCTURES

УДК 691.545

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ)



STUDY OF MICROSTRUCTURE OF MODIFIED CEMENT SYSTEMS IN VARIOUS OPERATING CONDITIONS (IN RELATION TO THE CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF BURUNDI)

Ками Килперик

аспирант кафедры технологии
строительных материалов, изделий и конструкций,
Воронежский государственный
технический университет
kchilperic1@gmail.com

Белькова Наталья Анатольевна

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии
строительных материалов, изделий и конструкций,
Воронежский государственный
технический университет
verlnata@mail.ru

Шмитко Евгений Иванович

доктор технических наук,
профессор кафедры технологии
строительных материалов, изделий и конструкций,
Воронежский государственный
технический университет
evgeny.shmitko@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены особенности исследования структуры материалов методом сканирующей электронной микроскопии. С помощью данного метода исследована структура цементного камня, подвергавшаяся эксплуатации при различных условиях, приближенных к условиям республики Бурунди. Выявлены основные направления изменения в структуре цементного камня и установлено, что при эксплуатации в воде происходит укрупнение и срастание кристаллов портландита и гидросиликатов кальция.

Ключевые слова: цементный камень, микроструктура, сканирующая микроскопия, климатические условия эксплуатации.

Kami Kilperik

Postgraduate Student
of the Department of Technology
of Building Materials,
Products and Structures,
Voronezh State Technical University
kchilperic1@gmail.com

Belkova Natalia Anatolyevna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
of the Department of Technology
of Building Materials,
Products and Structures,
Voronezh State Technical University
verlnata@mail.ru

Shmitko Evgeny Ivanovich

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department
of Technology of Building Materials,
Products and Structures,
Voronezh State Technical University
evgeny.shmitko@yandex.ru

Annotation. Peculiarities of investigation of materials structure by scanning electron microscopy method are considered in the paper. Using this method, the structure of the cement stone was studied, which was subjected to operation under various conditions close to the conditions of the Republic of Burundi. The main directions of changes in the structure of the cement stone were identified and it was established that during operation in water there is an enlargement and fusion of portlandite crystals and calcium hydrosilicates.

Keywords: cement stone, microstructure, scanning microscopy, climatic conditions of operation.

Свойства и долговечность цементных систем (в частности, тяжелых бетонов) определяются их структурой на различных масштабных уровнях [1, 2]. Особое внимание здесь необходимо уделить микроструктуре материала, формирование которой происходит под воздействием различных факторов. К ним относятся:

- химический и минералогический состав цемента;
- дисперсность, вид и дозировка исходных компонентов (вяжущего, добавок, наполнителей и заполнителей);
- технологические условия и режимы формирования структуры (перемешивание, способы формования, режимы и условия твердения).

Долговечность бетона зависит не только от выявленных ранее факторов, но и от степени агрессивности среды эксплуатации, которая вызывает ряд химических изменений и перерождений структурных элементов цементного камня, а также потерю защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. При этом именно структура цементного камня, формирующего свойства бетона, и ее стабильность в реальных условиях эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций подвергается наибольшему изменению [3, 4].

Изучением микроструктуры цементного камня с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) занимались такие ученые, как В.И. Горшков, Shondeep L. Sarkar, О.В. Артамонова [5–7]. В этих работах рассматривались процессы гидратации минералов цементного клинкера, а также условия формирования и морфологические особенности образующихся при этом основных гидратных фаз в различных условиях: от нескольких часов после затворения до 28 суток твердения.

Цель данной работы состояла в исследовании методом СЭМ изменений микроструктуры цементного камня в различных условиях эксплуатации, в частности, в условиях Бурунди.

Согласно данным, приведенным в [8, 9] в Бурунди ежегодно выделяют два основных сезона: сухой и жаркий сезон с температурой до 27 °С (июнь-июль), и влажный сезон дождей со средней температурой до 16 °С и сезонами – сильных (октябрь-апрель) и средних осадков (май-сентябрь).

То есть, в зависимости от вида и продолжительности воздействия внешних факторов на бетонные конструкции, можно разделить климатические воздействия в Бурунди на кратковременные (до 1–2 месяцев) и долговременные (2–7 месяцев).

Исследования проводились на цементном камне, изготовленном из цемента ЦЕМ II / В-П 32,5 М компании «BUCESCO» (Республика Бурунди) при В/Ц-отношении, равном 0,3. Модификация системы осуществлялась с помощью добавки-пластификатора «GLENIUM 323 MIX» в количестве 0,6 % от массы цемента.

В ходе экспериментальных исследований были реализованы следующие условия твердения и эксплуатации:

1. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\varphi = 90 \dots 100$ %) в течении 28 суток.
2. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\varphi = 90 \dots 100$ %) в течении 28 суток, эксплуатация в водонасыщенном состоянии, вода содержит умеренное количество растворенных солей в течении 3 суток.
3. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\varphi = 90 \dots 100$ %) в течении 28 суток, сухие условия эксплуатации при температуре 16–27 °С и влажности менее 60 % в течении 30 суток.
4. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\varphi = 90 \dots 100$ %) в течении 28 суток, эксплуатация в водонасыщенном состоянии, вода содержит умеренное количество растворенных солей в течении 30 суток.

5. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\phi = 90...100$ %) в течении 28 суток, сухие условия эксплуатации при температуре 16–27 °С и влажности менее 60 % в течении 60 суток.

6. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\phi = 90...100$ %) в течении 28 суток, эксплуатация в водонасыщенном состоянии, вода содержит умеренное количество растворенных солей в течении 60 суток.

7. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\phi = 90...100$ %) в течении 28 суток, сухие условия эксплуатации при температуре 16–27 °С и влажности менее 60 % в течении 210 суток.

8. Нормальные условия твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность $\phi = 90...100$ %) в течении 28 суток, эксплуатация в водонасыщенном состоянии, вода содержит умеренное количество растворенных солей в течении 210 суток.

Изучение микроструктуры образцов цементного камня осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom XL. Для проведения исследований использовали скол образца цементного камня, который закрепляли на предметном столике и помещали в сканирующий электронный микроскоп. Далее задавали условия съемки (режим обратно рассеянных электронов (BSE), ускоряющее напряжение 10 кВ, давление 0,10 Па) и производили измерения.

В ходе проведенных исследований были получены микрофотографии цементного камня на различных масштабных уровнях: микроуровне (размер метки 100 мкм, увеличение $\times 1100$ – 2000) (рис. 1) и субмикроуровне (размер метки 30 мкм, увеличение $\times 2500$ – 4500) (рис. 2).

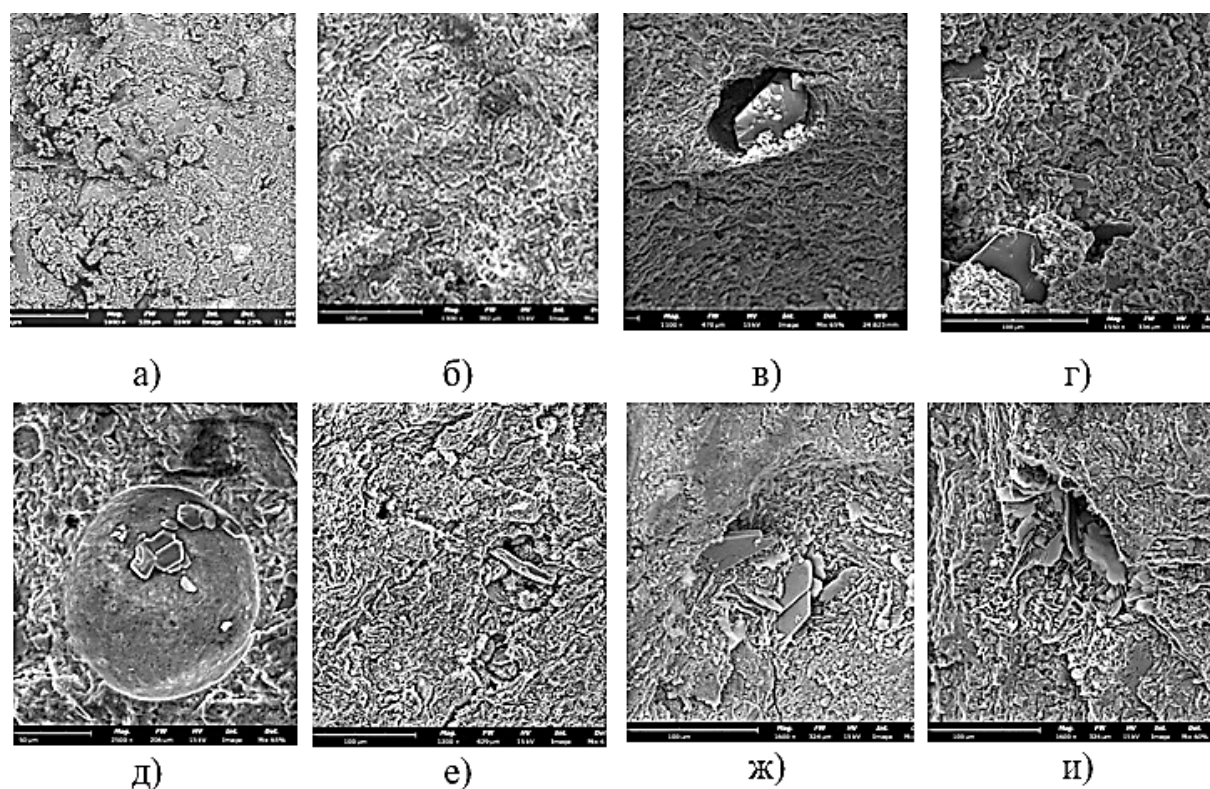


Рисунок 1 – Фрагменты структуры исследуемого цементного камня на микромасштабном уровне:

Обозначено: а – после 28 суток твердения; б – после 3 суток эксплуатации в воде; в – после 30 суток эксплуатации в сухих условиях; г – после 30 суток эксплуатации в воде; д – после 60 суток эксплуатации в сухих условиях; е – после 60 суток эксплуатации в воде; ж – после 210 суток эксплуатации в сухих условиях; и – после 210 суток эксплуатации в воде

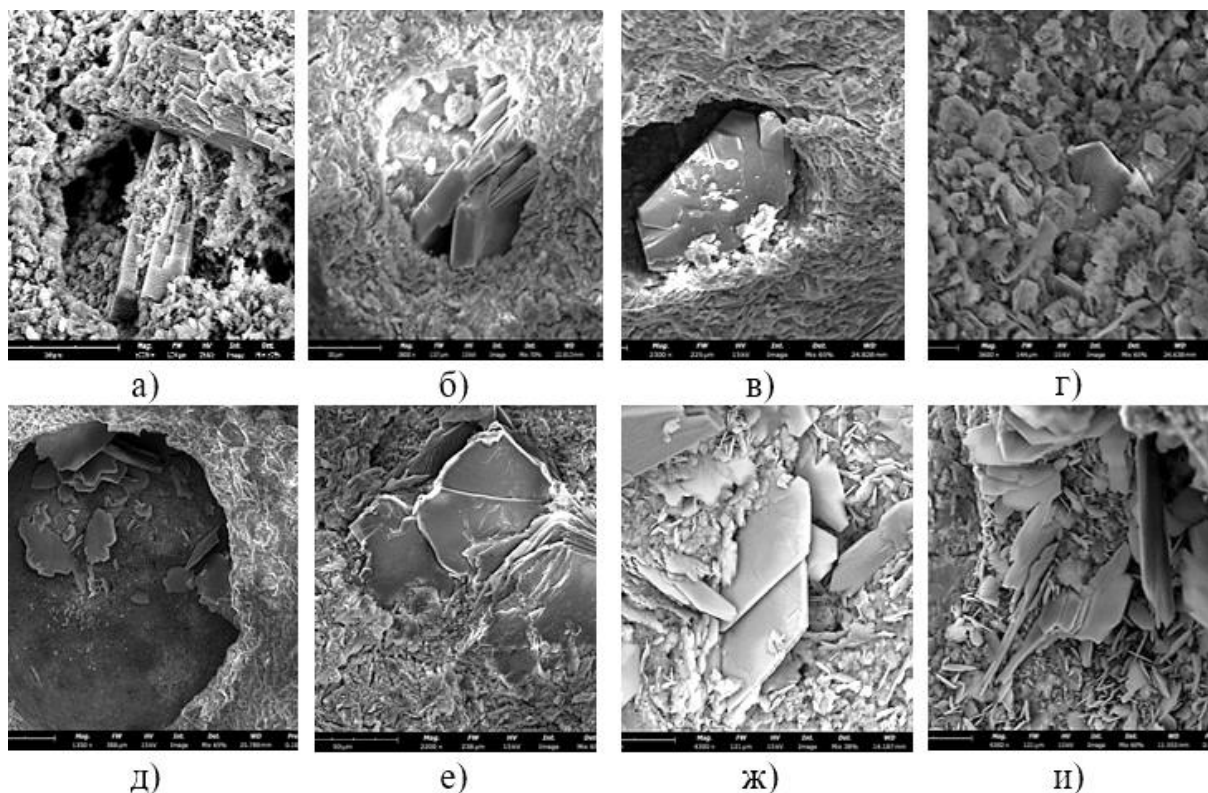


Рисунок 2 – Фрагменты структуры исследуемого цементного камня на субмикромасштабном уровне:

Обозначено: а – после 28 суток твердения; после 3 суток эксплуатации в воде; в – после 30 суток эксплуатации в сухих условиях; г – после 30 суток эксплуатации в воде; д – после 60 суток эксплуатации в сухих условиях; е – после 60 суток эксплуатации в воде; ж – после 210 суток эксплуатации в сухих условиях; и – после 210 суток эксплуатации в воде

Согласно данным, СЭМ на микромасштабном уровне структура цементного камня после 28 суток нормального твердения представлена неупорядоченной неоднородной массой с большим количеством пор. При эксплуатации материала в воде происходит постепенное уплотнение структуры и увеличение количества тоберморитового геля (гидросиликатов кальция). В случае эксплуатации цементного камня на воздухе наблюдается большое количество пор с формирующимися в них кристаллами гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в виде. Необходимо отметить, что в исследованиях используется цемент класса ЦЕМ II / В-П с пуццолановой добавкой, поэтому данных соединений образуется небольшое количество, и со временем они все связываются в нерастворимые гидросиликаты (даже в условиях эксплуатации в сухих условиях). Так же по полученным микрофотографиям видно, что при эксплуатации в воде кристаллы портландита обрастают и срастаются как друг с другом, так и с кристаллами гидросиликатов кальция, формируя плотную, слитную структуру, которая должна обеспечить долговечность материала. Далее рассмотрим особенности структуры на субмикроруровне.

На субмикроруровне структуры (рис. 2) наблюдаются более значительные отличия. Так, начальная структура цементного камня (1 вариант условий эксплуатации) представлена неоднородной аморфно-кристаллической структурой с кристаллитами различного размера и морфологии. В период эксплуатации в водной среде в течении от 3 до 210 суток отмечается формирование более плотной структуры с размером кристаллов портландита порядка 10...20 нм и

большим количеством контактов срастания и прорастания кристаллов гидросиликатов кальция. При этом увеличение времени эксплуатации в воде приводит к появлению более крупных сростков кристаллов портландита и постепенному зарастанию пор игольчатыми кристаллами сульфогидроалюминатов кальция (эттрингита) и гидросиликатов кальция.

В сухих условиях эксплуатации эти изменения практически отсутствуют: в структуре можно наблюдать срастание кристаллов портландита в крупные сростки, при этом в порах отсутствуют игольчатые кристаллы эттрингита.

Таким образом, методом СЭМ были исследованы особенности изменения структуры цементного камня, эксплуатируемого в различных условиях. Установлено, что изменения в структуре можно наблюдать начиная с субмикромасштабного уровня. При эксплуатации в водной среде происходит уплотнение структуры за счет образования кристаллов гидросиликатов кальция и эттрингита.

Литература

1. Artamonova O. Factors and mechanisms of nanomodification cement systems in the technological life cycle / O. Artamonova, E. Chernyshov, G. Slavcheva // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 1(109). – P. 10906.
2. Scrivener K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26(8). – P. 935–945.
3. Влияние органоминеральных добавок на физико-механические свойства и коррозионную стойкость цементно-песчаных растворов / Н. Суан Хунг [и др.] // Строительство: наука и образование. – 2020. – Т. 10. – № 1. – С. 5.
4. Артамонова О.В. Структура цементных систем как объект наномодифицирования / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 3(39). – С. 17–27.
5. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учеб. пособие для хим.-технол. вузов и факультетов / В.С. Горшков, В.В. Тимашов. – М. : Высшая школа, 1963. – 287 с.
6. Shondeep L. Sarkar. Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes / Shondeep L. Sarkar, Xu Aimin, Dipayan Jana // In the book «Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology» – New-York : William Andrew Publishing, 2001. – P. 231–274.
7. Шведова М.А. Исследование микроструктуры наномодифицированных цементных систем твердения методом сканирующей электронной микроскопии / М.А. Шведова, О.В. Артамонова, А.Ю. Ракитянская // Химия, физика и механика материалов. – 2022. – № 2(33). – С. 19–31. EDN SPIZUY
8. Каньяругендо Л. Температурные воздействия на гидротехнические сооружения // Материалы докладов 72-й междунар. студ. науч.-практ. конф., посвященной 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко. Российский гос. аграр. ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева. – М., 2019. – № 26. – С. 165–167.
9. Усачев С.М. Основные факторы износа конструкций из бетона в климатических условиях Республики Бурунди / С.М. Усачев, К. Ками // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 1(54). – С. 102–111.

References

1. Artamonova O. Factors and mechanisms of nanomodification cement systems in the technological life cycle / O. Artamonova, E. Chernyshov, G. Slavcheva // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 1(109). – P. 10906.
2. Scrivener K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26(8). – P. 935–945.
3. The influence of organomineral additives on the physical and mechanical properties and corrosion resistance of cement-sand mortars / N. Xuan Hung, V.L. Tang, B.I. Bulgakov [et al.] // Construction: science and education. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 5.
4. Artamonova O.V. The structure of cement systems as an object of nanomodification / O.V. Artamonova, G.S. Slavcheva // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. – 2015. – № 3(39). – P. 17–27.
5. Gorshkov V.S. Methods of physical and chemical analysis of astringents : tutory. manual for chemical technology. universities and faculties / V.S. Gorshkov, V.V. Timashov. – M. : Higher School, 1963. – 287 p.
6. Shondeep L. Sarkar. Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes / Shondeep L. Sarkar, Xu Aimin, Dipayan Jana // In the book «Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology» – New-York : William Andrew Publishing, 2001. – P. 231–274.
7. Shvedova M.A. Study of the microstructure of nanomodified cement hardening systems by scanning electron microscopy / M.A. Shvedova, O.V. Artamonova, A.Yu. Rakityanskaya // Chemistry, physics and mechanics of materials. – 2022. – № 2(33). – P. 19–31. EDN SPIZUY
8. Kanyarugendo L. Temperature effects on hydraulic structures // Materials of reports of the 72nd international student. scientific-practical conf., Dedicated to the 145th anniversary of the birth of A.G. Doyarenko. Russian state agrarian. University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. – M., 2019. – № 26. – P. 165–167.
9. Usachev S.M. The main factors of wear of concrete structures in the climatic conditions of the Republic of Burundi / S.M. Usachev, K. Kami // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. – 2023. – № 1(54). – P. 102–111.

СЫРЬЕ И КОМПОНЕНТЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

RAW MATERIALS AND COMPONENTS IN CONCRETE TECHNOLOGY

УДК 691.32

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСТРОБЕТОНА (HEMPCRETE) КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА



USE OF HEMPCRETE AS AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BUILDING MATERIAL

Афанасьева Яна Владимировна

член-корреспондент РИА и МИА,
инженер,

Российская инженерная академия (РИА);
Международная инженерная академия (МИА)
info.tupolev@yandex.ru

Afanasyeva Yana Vladimirovna

Corresponding Member
of the RIA and MIA,
Engineer,
Russian Academy of Engineering
(RAE);
International Academy of Engineering
(IAE)
info.tupolev@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена новому, экологически чистому, возобновляемому материалу – костробетону, производство и использование которого в настоящее время только растет, благодаря ряду исследований, проведенных в направлении изучения свойств этого материала. Бетон является одним из наиболее перспективных и часто используемых строительных материалов, и с каждым днем его использование увеличивается для удовлетворения потребностей быстро растущей строительной отрасли. В последнее десятилетие рост строительной отрасли, связанный со стремительной индустриализацией, привел к увеличению спроса на бетон в качестве строительного материала и как следствие к производству бетона в больших масштабах, что неизменно привело к значительному выбросу парниковых газов в окружающую среду. С одной стороны, это неизбежно, но необходимо изучать альтернативы, чтобы уменьшить воздействие бетона на окружающую среду. Необходимо найти альтернативное решение, позволяющее свести к минимуму выбросы парниковых газов на заводах по производству бетона. Одной из экологически чистых альтернатив обычному бетону является костробетон – это строительный материал, получаемый из конопляных волокон, извести и воды. Этот композитный материал обладает рядом полезных свойств, таких как низкая стоимость, доступность, тепло- и звукоизоляция, низкая плотность и устойчивость к выбросам углекислого газа, которые не оказывают негативного воздействия на производство. В данной статье рассмотрены свойства и некоторые преимущества костробетона.

Annotation. This article is dedicated to a new, environmentally friendly, renewable material – hemp concrete, the production and use of which is currently growing, thanks to a number of studies conducted in the direction of studying the properties of this material. Concrete is one of the most promising and frequently used building materials, and its use is increasing every day to meet the needs of the rapidly growing construction industry. In the last decade, the growth of the construction industry, driven by rapid industrialization, has led to an increase in demand for concrete as a building material and, as a result, to the production of concrete on a large scale, which has consistently resulted in significant greenhouse gas emissions. While this is inevitable, it is important to explore alternatives to reduce the environmental impact of concrete. It is necessary to find an alternative solution that minimizes greenhouse gas emissions in concrete production plants. One eco-friendly alternative to conventional concrete is hemp concrete, a building material made from hemp fibers, lime, and water. This composite material has a number of useful properties, such as low cost, availability, thermal and sound insulation, low density, and resistance to carbon dioxide emissions, which do not have a negative impact on production. This article discusses the properties and some advantages of hemp concrete.

Ключевые слова: костробетон, экологичность, тепловые свойства, долговечность, термостойкость, энергоэффективность.

Keywords: hemp concrete, environmental friendliness, thermal properties, durability, heat resistance, and energy efficiency.

Введение

Бетон является одним из наиболее перспективных и часто используемых строительных материалов, и с каждым днем его использование увеличивается для удовлетворения потребностей быстро растущей строительной отрасли. В последнее десятилетие рост строительной отрасли, связанный со стремительной урбанизацией и индустриализацией, привел к увеличению спроса на бетон в качестве строительного материала как в развитых, так и в развивающихся странах. На сегодняшний день в мире производится около 25 миллиардов тонн бетона в год. Объем рынка товарного бетона в 2024 году превысил 815,1 млрд долларов США и, по оценкам, будет расти со среднегодовым темпом роста более 8,6 % в период с 2025 по 2034 год [1].

На производство строительных материалов приходится 10 % ежегодного глобального выброса углекислого газа, в то время как на эксплуатацию зданий (отопление, охлаждение, электроснабжение и т.д.) приходится 27 % выбросов CO₂. Основным ингредиентом для производства бетона является цемент. Для производства одной тонны цемента в окружающую среду выбрасывается примерно 0,98 тонны углекислого газа. Выброс этого газа является одной из основных причин глобального потепления. Вклад строительной отрасли в изменение климата обусловил в 2015 году принять Парижское соглашение, в котором, в соответствии с Рамочной конвенцией Организации Объединенных Наций об изменении климата были прописаны ограничения повышения глобальной температуры менее чем на 2 °С, стремясь при этом к целевому показателю в 1,5 °С. В соответствии с Парижским соглашением была разработана политика, направленная на достижение нулевого уровня выбросов парниковых газов к 2050 году.

Потребность в новых, низкоуглеродистых или улавливающих углерод строительных материалах и методах их производства – это необходимый этап развития строительной отрасли в настоящее время. Проблема глобального потепления привлекает ученых к активному поиску подходящего альтернативного экологически чистого материала для строительной промышленности. Сейчас разработано несколько новых материалов, которые можно назвать экологически чистыми или «зелеными» строительными материалами. В различных исследованиях, проведенных учеными, изучалось использование растительных волокон и иных материалов в бетоне, таких как дерево, конопля, подсолнечник, лен, сизаль и т.д.

Если говорить о таком растительном материале как конопля, то она выращивается в тропических регионах мира и является одной из самых популярных культур. Биологическое название этого растения – *Cannabis Sativa* (рис. 1). Конопля быстрорастущее растение высотой от 1,5 до 4 метров, имеющее высокие темпы роста (около 4 месяцев), что делают коноплю высокорентабельной культурой. Волокна, полученные из конопляного стога, используются в качестве строительного материала наряду с известью и цементом [2].

Использование волокон конопли в строительной отрасли впервые было опробовано во Франции в 1990 году, хотя в прошлом конопля играла важную роль в производстве бумаги как волокнистое растение, и уже 3500 лет назад, во времена правления последней династии Египта, ее перерабатывали в шнур и ткани.



Рисунок 1 – Cannabis Sativa – конопля

Если говорить о строительной отрасли волокна конопли стали использоваться для производства бетона с меньшим весом путем изготовления смеси, состоящей из конопляного волокна (конопляной костры), извести и воды. Данный состав связывался вместе благодаря химической реакции, которая происходила при смешивании извести с водой, но до сих пор не существует стандартного состава смеси и у разных производителей состав смеси свой (рис. 2). Полученный материал имел ряд преимуществ, таких как низкая плотность – плотность костробетона колеблется в пределах 93,6 до 136,4 кг/м³, высокие звукоизоляционные свойства, возобновляемость и доступность, а также пассивная контроль влажности. Поры в костробетоне могут создавать дышащую структуру, которая поглощает влагу из окружающей среды и контролирует резкие перепады температуры и влажности. Термостойкие свойства костробетона позволяют каркасу здания нагреваться и оставаться теплым даже при изменении погодных условий.



Рисунок 2 – Hempcrete – костробетон

Конопля является сельскохозяйственным продуктом, поэтому она углеродно-отрицательный материал, который не выделяет углекислого газа в процессе производства. Конопля способна накапливать больше углерода на гек-

тар, чем почти любое другое растение, включая деревья, благодаря своим быстрым темпам роста. При изготовлении костробетона, после того как биомасса перерабатывается, смешивается с известью и вводится в конструкцию, углерод удерживается на протяжении всего срока службы конструкции. Известь также обеспечивает баланс энергии, используемой при ее производстве, удаляя CO₂ из воздуха по мере застывания. Коноплю, можно использовать в качестве наполнителя для строительства экологических и устойчивых конструкций. Конопля – это экологически чистый строительный материал с широким спектром применения, и ожидается, что в будущем она станет ценной культурой (рис. 3).



Рисунок 3 – Строеение из костробетона

Многие европейские страны изменили свои законы, чтобы разрешить производство и переработку конопли производственного назначения. Сырье для костробетона станет более доступным по мере распространения выращивания конопли по всему миру и упрощения работы перерабатывающих предприятий. В настоящее время во Франции, стране, которая первой применила коноплю в строительной отрасли в начале 1990-х годов, а затем и в других европейских странах, для строительных целей используется около 5000 тонн конопляного материала, популярность которого за последние годы многократно возросла в результате многочисленных исследований в этой области [3, 4].

Выводы

Потенциал костробетона, как экологически чистого материала заключается в том, что он позволяет экономить углерод, помогает контролировать влажность в доме, обеспечивая больший комфорт при более низких температурах и снижая расходы на электроэнергию.

Термостойкие свойства данного материала позволяют каркасу здания нагреваться и оставаться теплым даже при изменении погодных условий.

Костробетон обладает очевидными преимуществами в своей способности противостоять плесени, бактериям и сырости, которые являются распространенными проблемами для домовладельцев в старых зданиях и могут вызывать серьезные проблемы с дыханием.

Бетон и костробетон являются огнестойкими материалами и хорошо сохраняют тепло.

Костробетон не только помогает защитить окружающую среду от глобального потепления и изменения климата, но и обеспечивает комфорт в конструкциях.

Это экологичный материал будущего, и он может помочь развиваться строительной отрасли более экологичным образом, что приведет к улучшению результатов строительства.

Литература

1. 2025: Аналитика рынка бетона в России показала пиковый 14 % рост. – URL : <https://www.sostav.ru/blogs/32702/62603?ysclid=mgo5xzcdk8292002402>
2. Sudarshan D. Kore. Hemp concrete: A sustainable green material for conventional concrete / D. Kore Sudarshan, J.S. Sudarsan // Journal of Building Material Science. – 2021. – 8 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/354849347_Hemp_Concrete_A_Sustainable_Green_Material_for_Conventional_Concrete
3. Ali M. Memari, Nadia Mirzai, Mahsa Hashemi, Xinrui Lu, Corey Gracie-Griffin, Hojae Yi and Sarah Klinetob Lowe, In-situ measurement of residential buildings with hempcrete walls: a case study. *Frontiers in Sustainability*. – 2024. – 14 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/387745878_In-situ_Measurement_of_Residential_Buildings_with_Hempcrete_Walls_A_Case_Study
4. Kari Steyn. A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material / Kari Steyn, Wibke de Villiers, Adewumi John Babafemi // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2025. – 45 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/388987305_A_comprehensive_review_of_hempcrete_as_a_sustainable_building_material

References

1. 2025: Concrete market analytics in Russia showed a peak growth of 14 %. – URL : <https://www.sostav.ru/blogs/32702/62603?ysclid=mgo5xzcdk8292002402>
2. Sudarshan D. Kore. Hemp concrete: A sustainable green material for conventional concrete / D. Kore Sudarshan, J.S. Sudarsan // *Journal of Building Material Science*. – 2021. – 8 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/354849347_Hemp_Concrete_A_Sustainable_Green_Material_for_Conventional_Concrete
3. Ali M. Memari, Nadia Mirzai, Mahsa Hashemi, Xinrui Lu, Corey Gracie-Griffin, Hojae Yi and Sarah Klinetob Lowe, In-situ measurement of residential buildings with hempcrete walls: a case study. *Frontiers in Sustainability*. – 2024. – 14 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/387745878_In-situ_Measurement_of_Residential_Buildings_with_Hempcrete_Walls_A_Case_Study
4. Kari Steyn. A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material / Kari Steyn, Wibke de Villiers, Adewumi John Babafemi // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2025. – 45 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/388987305_A_comprehensive_review_of_hempcrete_as_a_sustainable_building_material

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СМЕСИ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОРКРЕТБЕТОНА**



**THE INFLUENCE OF CHEMICAL ADDITIVES ON MIXTURES
FOR THE PRODUCTION OF SHOTCRETE**

Иванова Татьяна Александровна

доцент кафедры архитектуры,
Кубанский государственный аграрный университет
emelyanova-tanya@mail.ru

Ясницкий Артём Борисович

студент кафедры архитектуры,
Кубанский государственный аграрный университет
artemasnickij5@gmail.com

Аннотация. В рамках данной научной работы выполнена задача по сбору, анализу и обработке информации по тематике международного опыта применения модифицирующих химических добавок в составы торкрет-бетонных смесей для улучшения их свойств при схватывании и созревании. Выдвинут обобщённый вывод по их эффективности и применимости в тех или иных условиях.

Ключевые слова: торкретбетон, строительство, бетонные смеси, химические добавки, современные технологии, мировой опыт строительства.

Tatyana Aleksandrovna Ivanova

Associate Professor
of the Department of Architecture,
Kuban State Agrarian University
emelyanova-tanya@mail.ru

Artyom Borisovich Yasnitsky

Student
of the Department of Architecture,
Kuban State Agrarian University
artemasnickij5@gmail.com

Annotation. This research paper collected, analyzed, and processed information on international experience with the use of modifying chemical additives in shotcrete mixtures to improve their setting and curing properties. A general conclusion is drawn regarding their effectiveness and applicability under specific conditions.

Keywords: shotcrete, construction, concrete mixtures, chemical additives, modern technologies, global construction experience

Актуальность. В современной строительной индустрии одним из важнейших факторов наряду с качеством и стоимостью проделанных работ имеют сроки реализации проекта. Технологи всего цивилизованного мира трудятся над совершенствованием старых и созданием новых технологий возведения зданий и сооружений. Ведётся поиск путей по сокращению затрат времени и трудоёмкости строительно-монтажных работ, совершенствуются строительные материалы и пути приведения их в проектное положение. Одной из прорывных технологий в железобетонном строительстве является технология торкретирования бетона. Разработанный в начале XX века в Соединённых Штатах Америки Карлом Акли метод для нанесения бетонной смеси на поверхность сухим способом изначально предназначался для реставрации музейных экспонатов. Однако затем торкретирование из-за ряда своих положительных качеств сильно поменяло взгляды инженеров всего мира на строительство. Его применяли в горном и гидрогеологическом строительстве, реставрациях и реконструкциях зданий и даже при возведении башен высокотемпературных доменных печей в чёрной металлургии [1, с. 238–242]. Универсальность применения технологии торкретирования обусловлена как общим для всех перечисленных достоинством – отсутствием необходимости возведения объёмной (двухсторонней опалубки) и повешенного внимания к вибрированию массивной конструкции, чего требует монолитное строительство, так и гибкость применяемых в составах смесей ингредиентов. Так в современных реалиях рынка строительной сферы в Российской Федерации торкретирование находится в догоняющих позициях. Основными работами в ПГС с использованием торкретных смесей является ремонт и реставрация. Чтобы конкурировать с устоявшимися за сто-

летия технологиями строительства торкретированию необходимы преимущества в сроках проведения работ, делающими его не просто рентабельным, а в идеале единственным возможным вариантом. Этими свойствами его наделяют модифицирующие химические добавки, что делает актуальность их изучения и разработки неоспоримой для отрасли [5, с. 55–57] [6, с. 126–135].

Классификация модифицирующих добавок для торкрет-бетонных смесей.

Модификаторы по происхождению подразделяются на *химические, минеральные, искусственные и натуральные*. Они могут производиться из *неорганических и органических* веществ, иметь различное агрегатное состояние, а также назначение [2, с. 24–33]. Основными физическими характеристиками для оценки применимости любого бетона являются: *проектная прочность, время набора проектной прочности (сроки схватывания и время созревания)*. В соответствии с вышеизложенным списком характеристик мировой рынок строительной индустрии предлагает линейки ускорителей схватывания, данные о свойствах и эффективности применения которых на основе исследованных испытаний будут приведены далее.

Испытания по определению сроков схватывания

Интересен лабораторный опыт исследования влияния ускорителей схватывания торкрет-бетонных смесей на сроки схватывания и прочность на осевое сжатие [3, с. 72–78] (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов бетонных смесей на сроки схватывания [3, с. 72–78]

	Сроки схватывания, мин	
	Начало схватывания	Конец схватывания
Контрольный образец	230	335
Centrament Rapid 650 (ООО «РapidБио», Россия)	2	4
MEYCOSA 167 («PCIAugsburgGmbH», Германия)	4	5
Sigunite L-53 («SIKA», Швейцария)	3	4
Реламикс Торкрет («Полипласт-УралСиб», Россия)	7	10

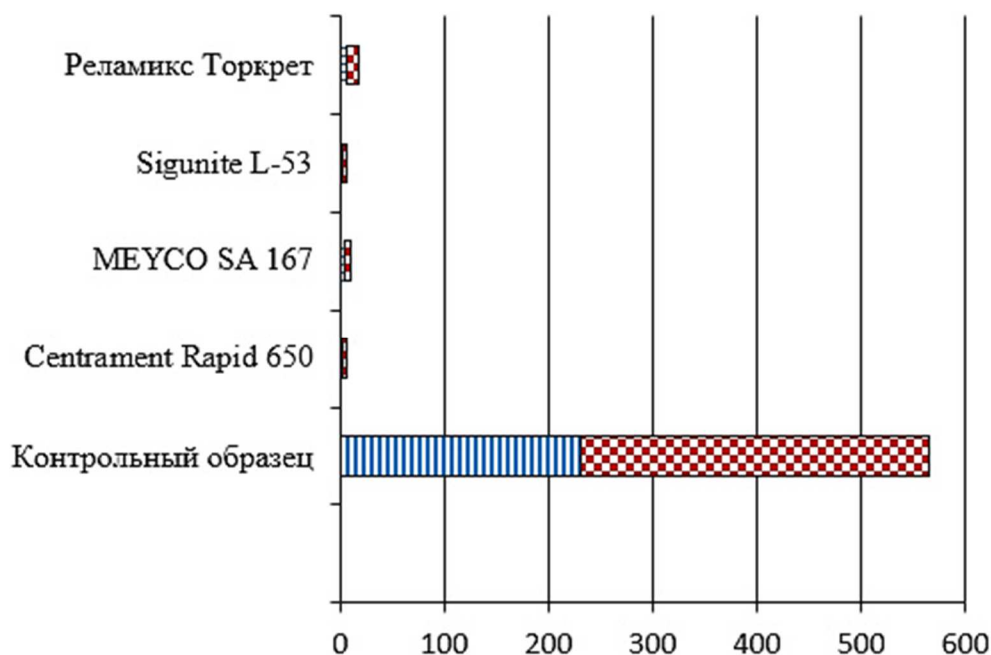


Рисунок 1 – График сроков схватывания образцов бетона с разными ускорителями схватывания, мин

Таблица 2 – Результаты испытаний прочности образцов бетона на сжатие [3, с. 72–78]

Образцы	Предел прочности на сжатие, МПа		
	6 часов	1 сутки	28 суток
Контрольный образец В45	0,4	12,6	45,3
Centrament Rapid 650	0,7	17,0	49,0
MEYCO SA 167	0,7	16,0	45,0
Sigunite L-53	0,6	13,7	40,9
Реламикс Торкрет	0,55	18,0	44,5

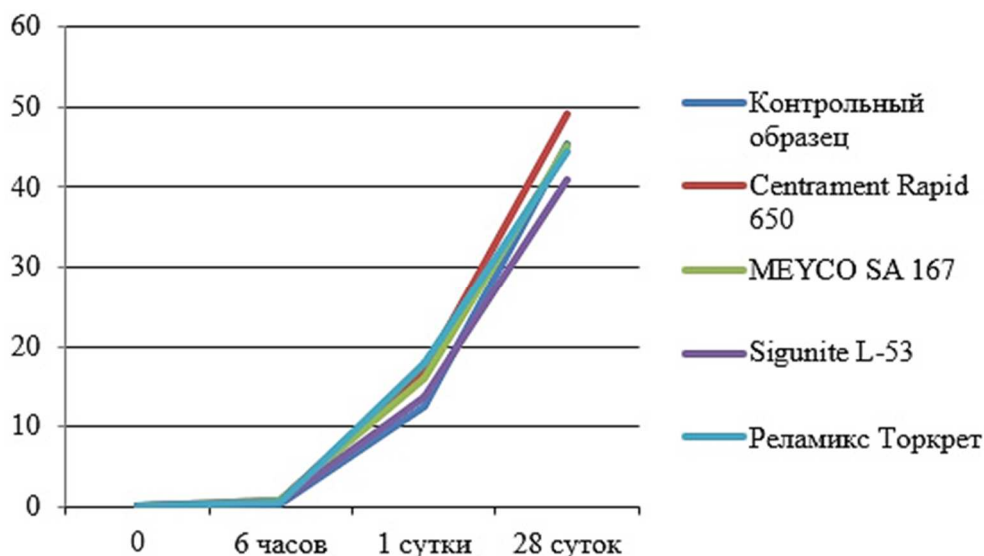


Рисунок 2 – График пределов прочности на сжатие образцов бетона с разными типами добавок, МПа [3, с. 72–78]

Торкретирование наиболее широкое применение получило зарубежом. В рамках иностранного опыта в области модифицирующих добавок для торкретбетона [4], в ходе испытаний предлагается сравнивать технические характеристики образцов с применением двух модифицирующих составов АФА-Н и АФА-Ф с контрольным образцом бетона.

Таблица 3 – Состав смесей испытуемых образцов бетона [4]

Компоненты	Контрольный образец	Смесь АФА-Н	Смесь АФА-Ф
Цемент (г)	900,0	900,0	900,0
Деионизированная вода (г)	450,0	413,6	422,1
Песок GSB 08-1337 (г)	1350,0	1350,0	1350,0
АФА-Н (г)	0	72	72
АФА-Ф (г)	0	72	72

Таблица 4 – Результаты испытаний образцов бетона с разными составами, ускоряющими схватывание при 20 и 5 °С [4]

Образцы	Дозировка, %	t, °С	Сроки схватывания, мин		Прочность на сжатие, МПа				
			Нач.	Кон.	6 ч	12 ч	24 ч	48 ч	72 ч
Контрольный образец	–	20	205	315	0	1,5	13,5	25,6	35,7
		5	258	425	0	0,6	8,5	13,6	23,5
Смесь АФА-Н (без фтора)	8	20	2:10	5:40	1,8	5,1	17,4	2,4	29,1
		5	3:30	8:00	0,5	2,3	10,2	16,6	26,9
Смесь АФА-Ф (с фтором 2.7 %)	8	20	1:00	1:20	0,1	0,3	6,9	16,5	19,1
		5	1:20	2:00	0	0	3,8	10,8	16,8

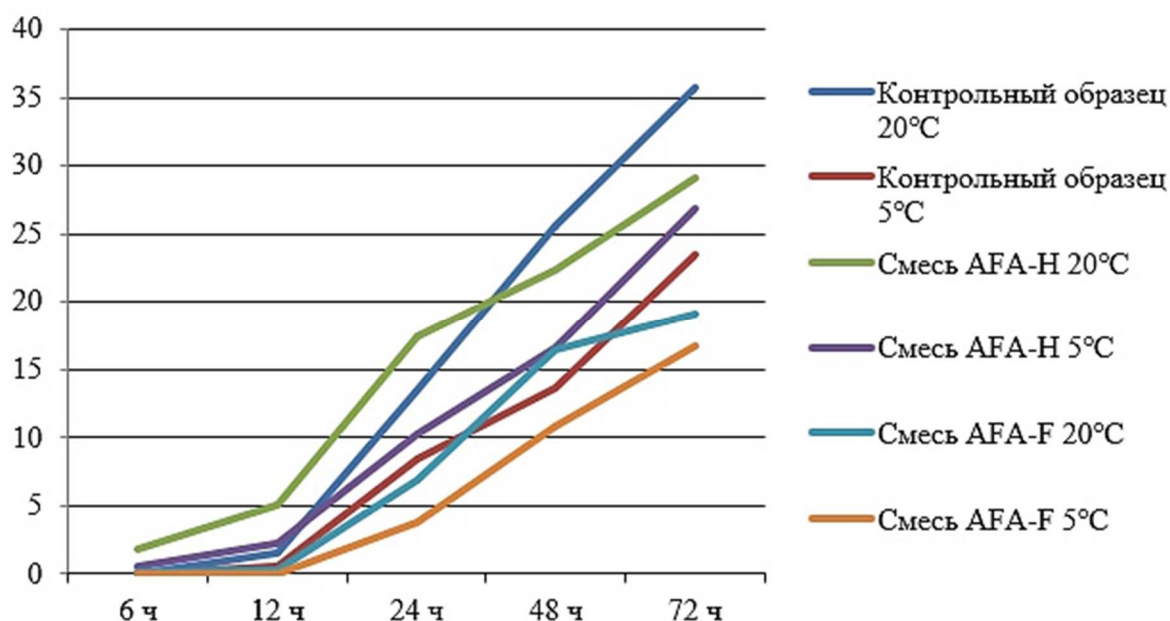


Рисунок 3 – График пределов прочности на сжатие образцов бетона с разными типами добавок при 20 и 5 °С, МПа [4]

Анализ исследований опыта применения добавок смесей для торкретбетона

Произведя анализ результатов испытания образцов бетона на сроки схватывания и осевое сжатие различных авторов, можно сформулировать вывод об очевидном сокращении сроков схватывания и созревания бетона на основе смеси с добавлением ускорителей схватывания. Также у некоторых образцов наблюдается увеличение итоговой проектной прочности на 28 сутки созревания. Но выявлены и образцы с пониженными прочностными характеристиками. Из результатов рассмотренных исследований известно о повышенном тепловыделении образцов с добавлением модернизирующих добавок. Это указывает на ускорение протекания химических реакций компонентов смеси с водой. Исходя из графика на рисунке 1 и 2 (рис. 1, рис. 2) можно утверждать, что разные составы модифицирующих добавок начинают и заканчивают своё действие в разных временных диапазонах. Так добавка Реламикс Торкрет начинает влиять на свойства бетонной смеси позже, чем остальные образцы, однако на временном промежутке равном 1 суткам состав с добавлением Реламикс Торкрет имеет самые высокие прочностные показатели из испытываемых. Затем действие добавки сходит на нет, и уже на 28 сутки созревания данный образец проигрывает контрольному образцу в прочности. Это является основанием для выдвижения тезиса о нелинейном действии модифицирующих добавок в составах торкрет-бетонных смесей.

В качестве подтверждения эффективности применения добавок в торкретбетон можно проанализировать результаты испытаний бетонных смесей [4]. По графику (рис. 3) видна и очевидна нелинейная зависимость набора прочностных характеристик от времени созревания бетона, модифицированного составами AFA-H и AFA-F. Так для AFA-H во временном промежутке 6–12 ч при температуре окружающей среды 20 °С характерен быстрый темп набора прочности по сравнению с контрольным образцом. Спустя сутки после схватывания темпы набора прочности у смеси с AFA-H и контрольного образца становятся почти равными, так как графики параллельны. На временной отметке равной около 36

часов прочность на сжатие у обоих образцов сравнялась. Дальнейшие испытания показывают отставание в наращивании прочности у модифицированного образца. Подобная тенденция наблюдается и с составом AFA-F. Также важно отметить существенное снижение эффективности применения ускоряющих добавок AFA-H и AFA-F при температуре 5 °С. Исходя из этого, можно сформулировать тезис о необходимости учёта данных о температуре окружающей среды при планировании применения модифицированных бетонных смесей на строительной площадке.

Заключение

Анализ представленной информации по испытаниям пластификаторов для торкретбетонных смесей выявил их эффективность в качестве ускорителей схватывания в лабораторных или натуральных условиях. Добавление модифицирующих компонентов в состав смеси при соблюдении технологии позволит существенно сократить сроки проведения работ, что при определённых условиях (наличия достаточного количества пластификаторов рядом со строительной площадкой, доступных цен на строительную химию и т.д.) может способствовать экономии бюджета строительства. Это делает исследования в сфере разработки новых составов торкретбетонных смесей более привлекательными для инвесторов и даёт толчок к дальнейшему развитию в будущем.

Литература

1. Ясницкий А.Б. Зарубежный опыт применения торкретбетона в строительстве // Строительство. Архитектура. Дизайн: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Курск, 25 апреля 2024 года. – Курск : ЗАО Университетская книга, 2024. – С. 238–242. EDN BSMNLH
2. Новикова У.А. Коррозионная стойкость торкрет-бетона в условиях воздействия растворов солей / У.А. Новикова, К.Б. Строкин, И.А. Красильникова // Строительные материалы. – 2024. – № 3. – С. 31–36. DOI 10.31659/0585-430X-2024-822-3-31-36. EDN AJPFİK
3. Васильев А.С. Эффективность добавок ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона / А.С. Васильев, Ю.Г. Барабанщиков // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8(34). – С. 72–78. DOI 10.5862/MCE.34.11
4. Влияние бесщелочных ускорителей торкрет-бетона на гидратацию в раннем возрасте и развитие свойств в цементных системах. Материалы (Базель) / В. Ван [и др.]. – 2022. – № 15(19):6907. Опубликовано 05 октября 2022 г. DOI 10.3390/MA15196907
5. Емельянова Т.А. Новый «старый» торкрет-бетон / Т.А. Емельянова, А.П. Денисова // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 10. – С. 55–57.
6. Голова Т.А. Технология производства неавтоклавных пенобетонов, дисперсно армированных модифицированными волокнами / Т.А. Голова, И.А. Магеррамова, Н.В. Андреева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 1(78). – С. 126–135.

References

1. Yasnitsky A.B. Foreign experience of using shotcrete in construction // Construction. Architecture. Design: Proceedings of the Fifth All-Russian scientific and practical conference of young scientists, Kursk, April 25, 2024. – Kursk : ZAO University Book, 2024. – P. 238–242. EDN BSMNLH

2. Novikova U.A. Corrosion resistance of shotcrete under the influence of salt solutions / U.A. Novikova, K.B. Strokin, I.A. Krasilnikova // Construction materials. – 2024. – № 3. – P. 31–36. DOI 10.31659/0585-430X-2024-822-3-31-36. EDN AJ-PFIK
3. Vasiliev A.S. Efficiency of setting and hardening accelerator additives for shotcrete / A.S. Vasiliev, Yu.G. Barabanshchikov // Journal of Civil Engineering. – 2012. – № 8(34). – P. 72–78. DOI 10.5862/MCE.34.11
4. The Influence of Alkali-Free Shotcrete Accelerators on Early Age Hydration and Property Development within Cement Systems. Materials (Basel) / W. Wang [et al.]. – 2022. – № 15(19):6907. Published 2022 Oct 5. DOI 10.3390/ma15196907
5. Emelyanova T.A. New «old» shotcrete / T.A. Emelyanova, A.P. Denisova // Industrial and civil engineering. – 2009. – № 10. – P. 55–57.
6. Golova T.A. Technology of production of non-autoclaved foam concrete, dispersedly reinforced with modified fibers / T.A. Golova, I.A. Magerramova, N.V. Andreeva // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. – 2020. – № 1(78). – P. 126–135.

**СТАНДАРТЫ КАЧЕСТВА И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ГЕОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ:
АНАЛИЗ ТЕКУЩИХ ТРЕБОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ**



**QUALITY STANDARDS AND ENVIRONMENTAL SAFETY
OF GEOPOLYMER MATERIALS:
ANALYSIS OF CURRENT REQUIREMENTS AND APPLICATION PROSPECTS**

Козлов Павел Геннадьевич

доцент департамента природно-технических систем
и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
kozlov.pg@dvfu.ru

Таскин Андрей Васильевич

кандидат химических наук,
заведующий лабораторией
использования вторичных ресурсов,
Дальневосточный федеральный университет
taskin@yandex.ru

Федюк Роман Сергеевич

доктор технических наук,
профессор,
профессор департамента природно-технических
систем и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
fedjuk.rs@dvfu.ru

Федотов Демьян Романович

старший преподаватель
департамента природно-технических систем
и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
fedotov.dr@dvfu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы практического применения геополимерных строительных материалов, при этом необходимо учитывать не только их технические свойства, но и экологические требования, поскольку это напрямую влияет на безопасность. В частности, с точки зрения экологической безопасности, важно ограничить выбросы CO₂ и предотвратить выщелачивание тяжелых металлов.

Ключевые слова: геополимерные материалы, климат, строительство, экологические требования.

Kozlov Pavel Gennadievich

Associate Professor
of the Department of Natural
and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
kozlov.pg@dvfu.ru

Taskin Andrey Vasilyevich

Candidate of Chemical Sciences,
Head of the Laboratory for the Use
of Secondary Resources,
Far Eastern Federal University
taskin@yandex.ru

Fedyuk Roman Sergeevich

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Professor of the Department
of Natural and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
fedjuk.rs@dvfu.ru

Fedotov Demyan Romanovich

Senior Lecturer of the Department
of Natural and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
fedotov.dr@dvfu.ru

Annotation. The article discusses the practical application of geopolymer building materials, while taking into account not only their technical properties, but also environmental requirements, as this directly affects safety. In particular, from the point of view of environmental safety, it is important to limit CO₂ emissions and prevent leaching of heavy metals.

Keywords: geopolymer materials, climate, construction, environmental requirements.

Геополимерные строительные материалы (рис. 1), получившие широкое распространение в строительной индустрии благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам и экологической устойчивости,

требуют четкого регулирования стандартами как на национальном, так и на международном уровне. Однако, как и любой новый материал, они сталкиваются с необходимостью соответствия строгим стандартам качества и экологической безопасности. В России в 2025 году планируется внедрение ряда нормативных документов, направленных на обеспечение контроля за качеством и экологической безопасностью геополимерных композитов [1].



Рисунок 1 – Внешний вид образцов-призм геополимерного бетона

Геополимерные материалы завоевывают все большее распространение в секторе гражданского строительства не только благодаря своим превосходным физическим свойствам по сравнению с обычным цементом, но и благодаря тому, что они менее вредны для окружающей среды, поскольку при синтезе геополимера не выделяются токсичные газы и не требуются высокие энергозатраты [2].

В работе [3] приведена авторская классификация современных бетонных композитов, в том числе геополимерных бетонов на шлако-щелочном вяжущем.

Основное внимание уделяется таким параметрам, как химический состав, механические характеристики, а также способность материалов минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Международные стандарты, такие как ASTM C618 и ASTM C1945, также играют ключевую роль в определении требований к производству этих материалов, особенно в условиях глобализации рынков строительных технологий [4]. Это делает их привлекательной альтернативой в контексте устойчивого строительства.

Одним из важнейших аспектов является влияние климатических условий на применение геополимерных материалов, что особенно актуально для регионов с суровыми погодными условиями, таких как Приморский край. Исследования показывают, что микроструктура золошлаковых отходов, используемых в качестве прекурсоров, содержит преимущественно алюмосиликаты (до 90 %), что обеспечивает их высокую реакционную способность при взаимодействии с щелочными активаторами [5]. Однако для успешного использования данных материалов необходимо учитывать не только технические, но и экологические требования. Например, содержание радионуклидов в золошлаковых отходах тепловых электростанций соответствует нормативам первого класса строительных материалов (удельная эффективная активность не превышает 370 Бк/кг), что делает их пригодными для всех типов строительных работ [5].

Качество геополимерных материалов напрямую зависит от выбора типа активатора и точного соблюдения технологических параметров. Согласно исследованиям, использование комбинации NaOH и Na_2SiO_3 позволяет достичь лучших результатов по сравнению с другими вариантами активаторов. Также установлено, что увеличение молярного модуля $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ выше оптимального значения (≤ 1.5) снижает прочностные характеристики материала, хотя и ускоряет время схватывания [1]. Это подчеркивает необходимость тщательного контроля над параметрами смеси и условиями отверждения, особенно в регионах с холодным климатом, где термообработка при температуре 50 °C может значительно повысить прочность готового продукта.

С точки зрения экологической безопасности, одним из главных требований является ограничение выбросов CO_2 и предотвращение выщелачивания тяжелых металлов. Производство геополимеров значительно сокращает выбросы парниковых газов по сравнению с производством портландцемента. Это является основным экологическим преимуществом.

Геополимеризация позволяет эффективно иммобилизовать такие металлы, как Zn, Pb, Cu и Cr, за счет трех механизмов: интеграции в геополимерную сетку, зарядового баланса и образования осадков [6]. Например, при использовании золы от сжигания муниципальных отходов (MSWI FA) концентрация иммобилизованных тяжелых металлов достигает более 98 % после 56 дней выдержки. При этом дополнительные методы обработки, такие как ультразвуковая карбонизация, позволяют существенно улучшить прочностные характеристики и одновременно закупоривать поры между частицами цемента, предотвращая миграцию загрязняющих веществ [6]. Синергетический эффект между золой и известняком также улучшает механические свойства бетона, что особенно важно для регионов с ограниченными запасами природных заполнителей, таких как Приморский край [3].

На международном уровне актуализированы стандарты ASTM C618 и ASTM C1945, которые учитывают современные подходы к классификации пуццолановых материалов, включая ранее захороненную золу [4]. Эти стандарты предлагают более гибкий подход к регулированию содержания летучих веществ, что открывает новые возможности для использования золошлаковых отходов в производстве экологически чистого бетона.

Ведутся работы по разработке стандартов в рамках CEN (Европейский комитет по стандартизации), которые будут охватывать различные типы геополимерных материалов и их применение.

Геополимерные строительные материалы позволяют эффективно утилизировать золошлаковые отходы теплоэлектростанций, что снижает нагрузку на полигоны и способствует циркулярной экономике.

В большинстве случаев, геополимеры не содержат вредных для здоровья человека и окружающей среды веществ. Однако, необходимо контролировать состав исходных материалов и активаторов на предмет наличия тяжелых металлов или других загрязнителей.

При производстве и эксплуатации геополимеров важно предотвращать попадание щелочных растворов в водоемы, чтобы избежать изменения pH и негативного воздействия на водную флору и фауну.

Перспективы применения геополимерных строительных материалов:

1. Конструкционные элементы: производство блоков, панелей, сборных железобетонных изделий, фундаментов.

2. Дорожное строительство: использование в качестве основания дорог, покрытий, а также для стабилизации грунтов [7].

3. Защитные сооружения: применение в условиях агрессивных сред, например, для защиты от коррозии или химического воздействия [8].

4. Реконструкция и реставрация: возможность использования для восстановления исторических зданий и сооружений, где требуется материал с низкой усадкой и высокой долговечностью.

5. 3D-печать в строительстве: геополимерные составы являются перспективными для использования в технологиях 3D-печати, позволяя создавать сложные архитектурные формы и сокращать время строительства.

6. Экологически чистые решения: внедрение геополимеров в проекты, ориентированные на «зеленое» строительство и снижение углеродного следа.

Несмотря на перспективы, существуют и вызовы, которые необходимо преодолеть для широкого внедрения геополимеров:

– отсутствие единых, признанных на международном уровне стандартов замедляет процесс сертификации и внедрения новых продуктов;

– строительная отрасль нуждается в квалифицированных кадрах, способных работать с новыми материалами и технологиями поэтому необходимы программы обучения и повышения квалификации;

– необходимо повышать осведомленность рынка о преимуществах геополимеров.

Таким образом, геополимерные материалы, при условии соблюдения стандартов и технологических требований, представляют собой экологически безопасное и эффективное решение для строительной индустрии, способствующее устойчивому развитию и утилизации промышленных отходов. Учитывая значительный потенциал данных материалов, их использование может стать важным шагом на пути к снижению углеродного следа строительной индустрии и решению проблемы утилизации промышленных отходов.

Литература

1. Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* / Y. Ling [et al.]. – 2019. – № 228. – P. 116763. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116763>
2. Durability of geopolymers with industrial waste. *Case Studies in Construction Materials* / L.B. de Oliveira [et al.]. – 2022. – Vol 16. – e00839.
3. Баженов Ю.М. Обзор современных высокоэффективных бетонов / Ю.М. Баженов, Р.С. Федюк, В.С. Лесовик // *Научное издание технологий и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова.* – 2019. – С. 45–49.
4. Simpson J. Delayed Coal Plant Retirements Promise Yet More Ash for Concrete Markets // *Applications, Science, and Sustainability of Coal Ash.* – 2025. – Iss. 1. – P. 10–14. – URL : <https://aca-usa.org/wp-content/uploads/2025/07/ASH-2025-1.pdf> (date of application 30.08.2025).
5. Effective cement binders on fly and slag waste from heat power industry of the Primorsky krai, Russian Federation / A. Taskin [et al.] // *International Journal of Scientific and Technology Research.* – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 3509–3512.
6. Synthesis and application of geopolymers from municipal waste incineration fly ash (MSWI FA) as raw ingredient – A review / T. Lan [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling.* – 2022. – Vol. 182. – P. 106308. DOI 10.1016/j.resconrec.2022.106308

7. Утилизация вскрышных пород в составах композиционных материалов для устройства технологических дорог горнорудных предприятий / Д.В. Бесполитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 188–197.
8. Алексейко Л.Н. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики / Л.Н. Алексейко, А.В. Таскин // Экология и развитие общества. Труды IX Международной конференции. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). – 2005. – С. 12–21.

References

1. Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* / Y. Ling [et al.]. – 2019. – № 228. – P. 116763. URL : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116763>
2. Durability of geopolymers with industrial waste. *Case Studies in Construction Materials* / L.B. de Oliveira [et al.]. – 2022. – Vol 16. – e00839.
3. Bazhenov Yu.M. Review of modern high-performance concretes / Yu.M. Bazhenov, R.S. Fedyuk, V.S. Lesovik // High-tech technologies and innovations. Electronic collection of reports of the International scientific and practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2019. – P. 45–49.
4. Simpson J. Delayed Coal Plant Retirements Promise Yet More Ash for Concrete Markets // *Applications, Science, and Sustainability of Coal Ash*. – 2025. – Iss. 1. – P. 10–14. – URL : <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2025/07/ASH-2025-1.pdf> (date of application 30.08.2025).
5. Effective cement binders on fly and slag waste from heat power industry of the Primorsky krai, Russian Federation / A. Taskin [et al.] // *International Journal of Scientific and Technology Research*. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 3509–3512.
6. Synthesis and application of geopolymers from municipal waste incineration fly ash (MSWI FA) as raw ingredient – A review / T. Lan [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2022. – Vol. 182. – P. 106308. DOI 10.1016/j.resconrec.2022.106308
7. Utilization of overburden rocks in composite materials for the construction of technological roads of mining enterprises / D.V. Bespolitov [et al.] // *Physico-technical problems of mining*. – 2023. – № 1. – P. 188–197.
8. Alekseko L.N. On complex processing of ash and slag waste of energy / L.N. Alekseko, A.V. Taskin // *Ecology and social development. Proceedings of the IX International Conference. International Academy of Sciences of Ecology, Human Safety and Nature (MANEB)*. – 2005. – P. 12–21.

ЗОЛОШЛАКОВЫЕ ОТХОДЫ КАК РЕСУРС: АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ



ASH AND SLAG WASTE AS A RESOURCE: ANALYSIS OF APPLICATION POSSIBILITIES

Козлов Павел Геннадьевич

доцент департамента природно-технических систем
и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
kozlov.pg@dvfu.ru

Таскин Андрей Васильевич

кандидат химических наук,
заведующий лабораторией
использования вторичных ресурсов,
Дальневосточный федеральный университет
taskin@yandex.ru

Федюк Роман Сергеевич

доктор технических наук,
профессор,
профессор департамента природно-технических
систем и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
fedjuk.rs@dvfu.ru

Федотов Демьян Романович

старший преподаватель
департамента природно-технических систем
и техносферной безопасности,
Дальневосточный федеральный университет
fedotov.dr@dvfu.ru

Аннотация. В Приморском крае остро стоит проблема утилизации огромных объемов золошлаковых отходов (ЗШО). Данная статья предлагает инновационное решение: использование ЗШО в качестве основного сырья для производства современных геополлимерных строительных материалов и топливных брикетов из недожога угля. Этот подход не только решает насущную экологическую задачу, но и открывает новые горизонты для развития «зеленой» экономики, включая интеграцию сельскохозяйственного сектора в производственные цепочки. Применение ЗШО в геополлимерном производстве является шагом к устойчивому развитию строительной отрасли и существенному снижению экологического воздействия. Для дальнейшего масштабирования и коммерциализации данного направления необходимо сосредоточить усилия на повышении стандартов контроля качества, оптимизации производственных затрат и активном освоении международных рынков для инновационных материалов из ЗШО.

Kozlov Pavel Gennadievich

Associate Professor
of the Department of Natural
and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
kozlov.pg@dvfu.ru

Taskin Andrey Vasilyevich

Candidate of Chemical Sciences,
Head of the Laboratory for the Use
of Secondary Resources,
Far Eastern Federal University
taskin@yandex.ru

Fedyuk Roman Sergeevich

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Professor of the Department
of Natural and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
fedjuk.rs@dvfu.ru

Fedotov Demyan Romanovich

Senior Lecturer of the Department
of Natural and Technical Systems
and Technosphere Safety,
Far Eastern Federal University
fedotov.dr@dvfu.ru

Annotation. In Primorsky Krai, the problem of recycling huge volumes of ash and slag waste is acute. This article offers an innovative solution: the use of waste as the main raw material for the production of modern geopolymer building materials and fuel briquettes from underburned coal. This approach not only solves an urgent environmental problem, but also opens up new horizons for the development of a «green» economy, including the integration of the agricultural sector into production chains. The use of ash and slag in geopolymer production is a step towards the sustainable development of the construction industry and a significant reduction in environmental impact. To further scale and commercialize this area, it is necessary to focus on improving quality control standards, optimizing production costs, and actively exploring international markets for innovative materials.

Ключевые слова: брикет топливный, геополимер, экология, золошлаковые отходы, теплоэлектростанция.

Keywords: fuel briquette, geopolymer, ecology, ash and slag waste, thermal power plant.

В Российской Федерации доля ЗШО, вовлекаемых в переработку для нужд строительства, дорожного строительства и других отраслей промышленности, составляет 15 % от общего объема. Для увеличения масштабов применения ЗШО и разработки новых строительных материалов необходима разработка соответствующих технологий и создание благоприятной инфраструктуры.

В условиях обострения экологических проблем, переработка ЗШО становится актуальной задачей. Сотрудничество со строительными компаниями способствует внедрению соответствующих технологий, позволяющих решать проблему утилизации накопленных ЗШО и предотвращать образование новых отвалов вблизи теплоэлектростанций (ТЭС). Тем не менее, несмотря на экологическую целесообразность, использование этих технологий сопряжено с определенными техническими сложностями, требующими тщательного изучения. Исследование опирается на передовые природоподобные технологии, в частности, на принципы геоники, которые позволяют воспроизводить естественные геологические процессы в промышленных масштабах как будто мы имитируем, как образуются камни в природе [1].

Технологии переработки золошлаковых отходов представляют собой перспективное направление развития экологически ориентированной экономики, что особенно значимо в контексте накопленных объемов отходов на территории Приморского края. Важным аспектом их применения является оценка экологических преимуществ, среди которых снижение углеродного следа и минимизация объемов складированных отходов, занимают центральное место [2].

Исследования, проведенные в лабораторных условиях и подтвержденные практическим применением в строительстве, показали эффективность шлакощелочных вяжущих и бетонов, изготовленных из шлаков и зол теплоэлектростанций. Кроме того, активированные золошлаковые смеси продемонстрировали хорошие результаты при использовании в дорожном строительстве и стабилизации грунтов [3, 4]. Использование золошлаковых отходов в бетонной смеси делает производство бетона экономически эффективнее, увеличивает объемы его производства и снижает затраты. Это также уменьшает негативное воздействие на окружающую среду благодаря повторному использованию золы и сокращению загрязненных территорий [5].

Оценка воздействия ЗШО на природную окружающую среду проводилась методами:

1. Химического анализа, который позволяет установить наличие и количество токсичных элементов в почве и других компонентах окружающей среды.
2. Биологическими исследованиями, направленными на выявление того, как органические вещества влияют на различные формы жизни, включая растительность, фауну и микрофлору.
3. Моделирования – для создания математических прогнозов того, как токсичные вещества будут распространяться и какое воздействие окажут на окружающую среду.
4. Оценка рисков – для определения вероятности возникновения негативных последствий загрязнения и их потенциального ущерба для здоровья человека и природных систем.

Комплекс мер по снижению воздействия отходов (ЗШО):

1. Внедрение в производственный процесс передовых технологий, позволяющих минимизировать образование ЗШО и снижать их потенциальную опасность для окружающей среды.

2. Эффективная утилизация, способствующая максимальному вовлечению ЗШО в хозяйственный оборот, используя их в качестве вторичного сырья для производства строительных материалов, в дорожном строительстве и других промышленных секторах.

3. Организация специализированных мест для долговременного хранения ЗШО, проектируемых с учетом гидрогеологических особенностей территории и оснащенных системами для предотвращения утечек и загрязнения.

4. Проведение комплекса мероприятий по рекультивации и восстановлению экологического состояния земель, подвергшихся воздействию ЗШО, включая озеленение, создание искусственных водоемов и другие восстановительные работы.

Снижение антропогенного воздействия ЗШО достигается посредством геоэкологической оценки их негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека. Эта оценка является важным инструментом, который минимизирует экологический ущерб от ЗШО и обеспечивает основу для устойчивого развития, то есть такого развития, которое удовлетворяет потребности настоящего, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности [6].

Геополимерные строительные материалы, получаемые из ЗШО, демонстрируют высокую механическую прочность и низкий углеродный след, что делает их привлекательной альтернативой традиционным строительным материалам. Однако их широкое внедрение зависит от ряда факторов, включая экономическую целесообразность производства и конкурентоспособность на глобальном рынке [2].

Лаборатория технологий использования вторичных ресурсов ДВФУ, в сотрудничестве с научно-организационным управлением Международного центра обогащения минерального сырья и использования вторичных ресурсов, демонстрирует активный прогресс в совершенствовании технологий производства строительных материалов из золошлаковых отходов энергетической промышленности, создали технологическую линию для переработки золошлаковых отходов – продуктов сжигания угольного топлива [7].

Методы очистки, такие как промывка ЗШО, позволяют удалить недожог угля и другие загрязняющие вещества, что улучшает реакционную способность материала, а термическая обработка улучшает дисперсность и активность ЗШО, что увеличивает скорость геополимеризации [8].

Одним из основных технических ограничений технологий, используемых для переработки ЗШО, является сложность длительного хранения исходного сырья, характеризующегося высокой гигроскопичностью, что делает их чувствительными к изменению уровня влажности. Исследования показывают, что влажность ЗШО напрямую влияет на эффективность их подготовки и очистки перед дальнейшим использованием [9]. Например, повышенная влажность может привести к снижению реакционной способности материала, что усложняет процесс формирования геополимерных связей. Оптимальные молярные соотношения оксидов для геополимеров, таких как H_2O/Na_2O (15–17.50), Na_2O/SiO_2 (0.20–0.28) и SiO_2/Al_2O_3 (3.50–4.50), требуют точного контроля содержания воды, так как избыток или недостаток жидкости может значительно снизить механическую прочность конечного продукта [10]. Эти требования создают дополни-

тельные сложности при масштабировании технологии в промышленных условиях, где колебания влажности могут быть вызваны внешними факторами, такими как погодные условия или условия хранения.

Кроме того, рыночные перспективы материалов, получаемых из ЗШО, таких как геополимеры и брикеты из недожога угля, также требуют внимательного рассмотрения. Например, производство брикетов из недожога угля (рис. 1), который составляет около 120,0 кг/т в составе ЗШО, может стать перспективным направлением для Приморского края.

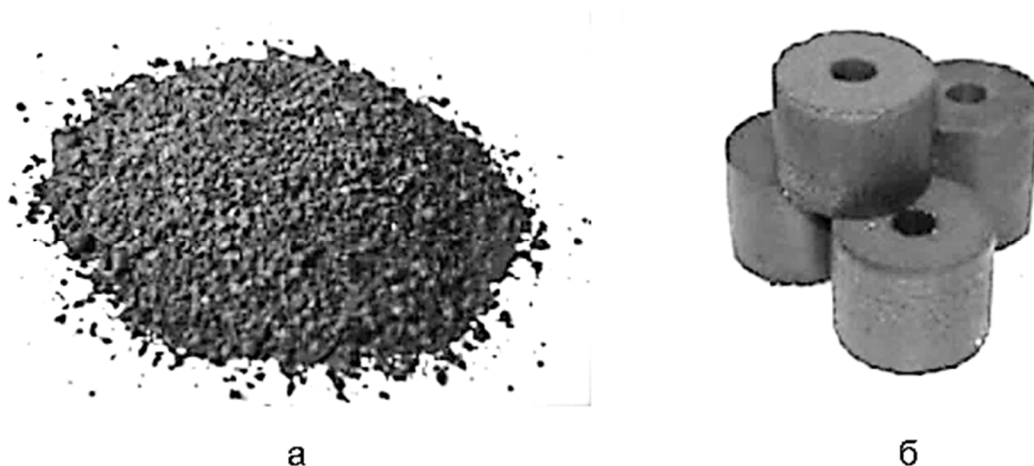


Рисунок 1 – Недожог угля (а) и топливные брикеты (б) на его основе [11]

Такие брикеты обладают высокой теплотворной способностью, низким содержанием золы и сниженными выбросами по сравнению с традиционными видами топлива, что соответствует современным экологическим стандартам [12].

Глобальный рынок брикетов из недожога демонстрирует устойчивый рост благодаря увеличению спроса на возобновляемую энергию и строгим экологическим нормам. Для Приморского края это открывает возможности для экспорта продукции, особенно с учетом накопленных объемов отходов (3600000 тонн) и потенциала переработки до 10 % от общего объема [12].

Тем не менее, успешная реализация проектов по переработке ЗШО требует решения ряда организационных и финансовых вопросов. Например, выбор оборудования, оптимизация процесса компактирования и обеспечение высокого качества конечного продукта зависят от уровня инвестиций и доступности современных технологий [12].

Внедрение автоматизированных линий может повысить эффективность производства, однако требует значительных капитальных затрат. Кроме того, необходимость проведения точных методов анализа для мониторинга качества воздуха и контроля выбросов при переработке ЗШО подчеркивает важность разработки специализированных методик [9].

Для анализа процесса геополимеризации рассмотрим такие параметры, как химический состав, фракционный состав, методы обработки и их влияние на прочность геополимерных строительных материалов (табл. 1). Эти данные помогут определить подходящие технологии для Приморского края.

В таблице представлены основные параметры, которые необходимо учитывать при подготовке ЗШО для производства геополимеров, например, соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ играет ключевую роль в формировании прочностных харак-

теристик материала. Оптимальное значение этого параметра находится в диапазоне 3,0–3,8, что обеспечивает высокую степень поликонденсации и повышает механическую прочность геополимеров до 76 МПа после 28 дней твердения [13].

Таблица 1 – Факторы, определяющие прочность геополимерных материалов

Параметр обработки	Оптимальное значение / условие	Влияние на свойства материала	Источники
Соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3–3.8	Улучшение механической прочности	[13]
Температура отверждения	50–80°C	Сокращение времени схватывания	[13, 14]
Концентрация щелочного активатора	20–25%	Увеличение тепловыделения и прочности	[14]
Размер частиц	Мелкие (< 125 мкм) и средние (125 мкм – 1 мм)	Повышение реакционной способности	[10]
Метод очистки	Промывка, термообработка	Удаление загрязняющих веществ	[10, 15]

Температурная обработка также является важным фактором. Исследования показывают, что температура отверждения в диапазоне 50–80 °С значительно сокращает время достижения пика полимеризации и повышает прочность готового продукта. Однако длительное воздействие высоких температур (> 80 °С) может снижать долговременную прочность материала [13].

Размер частиц ЗШО оказывает значительное влияние на характеристики получаемых геополимерных материалов. Более мелкие частицы способствуют увеличению прочности за счет дополнительных сайтов гидратации. Для минимизации усадки требуется высокое начальное содержание воды, которое позволяет дополнительной воде испаряться до начала усадки [10].

В ходе анализа процессов изготовления геополимерных строительных материалов (рис. 2) из ЗШО установлено, что данный подход представляет собой многообещающее направление для решения экологических проблем и оптимизации ресурсоэффективности региональной экономики.



Рисунок 2 – Образцы-призмы из геополимерного бетона, подготовленные для испытания

Химический состав ЗШО, включая их высокую концентрацию оксидов кремния и алюминия, а также наличие редкоземельных элементов, предостав-

ляет уникальные возможности для их использования в качестве сырья для геополимеров и других строительных материалов. Однако успешное внедрение этих технологий требует комплексного подхода, учитывающего не только физико-химические свойства исходных материалов, но и особенности их переработки.

В работе [16] рассматриваются вопросы структурообразования композиционных вяжущих на основе отходов производства, являющихся нетрадиционным вторичным сырьем для получения строительных материалов.

Улучшение характеристик композиционных материалов достигается за счет переработки и измельчения техногенных отходов тепловых электростанций. Эти отходы, будучи интегрированными в матрицу, инициируют синтез низкоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Образующаяся в результате более плотная структура композита обеспечивает существенное повышение его прочности, водостойкости и общей долговечности [17].

Золошлаковые отходы представляют собой ценный ресурс для производства геополимерных строительных материалов, брикетов из недожога и решения экологических проблем. Реализация проектов по переработке ЗШО в регионах России (например, Приморский край), требует значительных инвестиций, современных технологий и автоматизированного оборудования. Государственная поддержка, разработка стандартов качества и дальнейшие исследования необходимы для успешного внедрения этих технологий и создания новых экономических возможностей.

Экономическая целесообразность применения ЗШО также подтверждается возможностью их использования для производства высокоэффективных топливных брикетов и сокращения логистических затрат за счет местного сырья. Государственные программы поддержки, такие как «TechnoVostok 2030» и инициативы правительства Приморского края, открывают новые возможности для развития проектов по переработке золошлаковых отходов в геополимеры. Это способствует не только решению экологических проблем, но и созданию новых рыночных ниш для продукции с высокой добавленной стоимостью.

Литература

1. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика) как теоретическая база создания строительных материалов нового поколения // Региональное сотрудничество БРИКС: вопросы рационального природопользования – экология, просвещение, туризм: Материалы Международной научно-практической конференции: тезисы докладов, Петрозаводск, 14–15 сентября 2023 года. – Петрозаводск : ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2023. – С. 23–24.
2. Russia's Primorsky Krai advances waste management partnership with Chinese firms. – URL : <https://en.imsilkroad.com/p/345611.html> (дата обращения 30.08.2025).
3. Юдина Л.В. Строительные материалы контактного твердения на основе шлаков, зол и грунтов / Л.В. Юдина, В.В. Турчин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 2 (14). – С. 303–307.
4. Оценка пригодности золошлаковых отходов для производства дорожно-строительных материалов / П.П. Панков [и др.] // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27. – № 5. – С. 15–21.
5. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 85–88. DOI 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88

6. Козлов, П.Г. Снижение воздействия золошлаковых отходов на окружающую среду // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития : материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Абакан, 13–15 ноября 2024 года. – Абакан : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», 2024. – С. 150–151.
7. Алексейко Л.Н. Технологическая линия для переработки золошлаковых отходов – продуктов сжигания угольного топлива / Л.Н. Алексейко, А.В. Таскин, А.А. Черепанов // Патент на изобретение RU 2489214 С1, 10.08.2013. Заявка № 2012123064/03 от 04.06.2012.
8. Перспективные технологии переработки золошлаковых отходов в геополимеры / П.Г. Козлов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2024. – № 3(93). – С. 19–29. DOI 10.17277/voprosy.2024.03.pp.019-029
9. Effective cement binders on fly and slag waste from heat power industry of the Primorsky krai, Russian Federation / A. Taskin [et al.] // International Journal of Scientific and Technology Research. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 3509–3512.
10. Luhar I.A Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer / I. Luhar, S. Luhar // Journal of Composites Science. – 2022. – Vol. 6. – № 8. – P. 219. DOI 10.3390/jcs6080219.
11. Строительные материалы и минеральные вяжущие вещества на основе гидратированных золошлаковых отходов углесжигающих электростанций и отходов углеобогащения / А.В. Таскин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2023. – Т. 14. – № 4. – С. 201–206. DOI 10.37614/2949-1215.2023.14.4.034
12. Biomass Briquettes Manufacturing Plant Cost, Setup Report 2025, Raw Material Requirements and Industry Trends – Researz. – URL : <https://www.imarcgroup.com/biomass-briquettes-manufacturing-plant-project-report> (date of application 30.08.2025).
13. Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications / R. Khan [et al.] // RSC Advances (RSC Publishing). 2025 Apr 22; 15(16):12443–12471. DOI 10.1039/d4ra07601j
14. Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer / Y. Ling [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – № 228. – 116763 p. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116763>
15. Detailed characterization of particle size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash / E. Loginova [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 207. – P. 866–874. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.022
16. Структурообразование композиционных материалов для усиления земляного полотна / П.П. Панков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 4(784). – С. 103–116.
17. Improvement of Performances of the Gypsum-Cement Fiber Reinforced Composite (GCFRC). Materials / N. Chernysheva [et al.]. – 2020. DOI 10.3390/ma13173847

References

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for creating new-generation building materials // BRICS regional cooperation: issues of rational

- use of natural resources – ecology, education, tourism: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: abstracts, Petrozavodsk, September 14–15, 2023. – Petrozavodsk : Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2023. – P. 23–24.
2. Russia's Primorsky Krai advances waste management partnership with Chinese firms. – URL : <https://en.imsilkroad.com/p/345611.html> (date of application 08/30/2025)
 3. Yudina, L.V. Building materials of contact hardening based on slags, ashes and soils / L.V. Yudina, V.V. Turchin // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2010. – № 2(14). – P. 303–307.
 4. Assessment of the suitability of ash and slag waste for the production of road construction materials / P.P. Pankov [et al.] // Ecology and industry of Russia. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 15–21.
 5. Astafieva O.E. The use of ash and slag waste in the construction materials industry // Coal. – 2024. – № 2. – P. 85–88. DOI 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88
 6. Kozlov P.G. Reducing the impact of ash and slag waste on the environment // Engineering technologies: traditions, innovations, development vectors: proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation, Abakan, November 13–15, 2024. – Abakan : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «N.F. Katanov Khakass State University», 2024. – P. 150–151.
 7. Alekseko L.N. Technological line for processing ash and slag waste products of coal fuel combustion / L.N. Alekseko, A.V. Taskin, A.A. Cherepanov // Patent for invention RU 2489214 C1, 08/10/2013. Application № 2012123064/03 dated 06/04/2012.
 8. Promising technologies for processing ash and slag waste into geopolymers / P.G. Kozlov [et al.] // Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University. – 2024. – № 3(93). – P. 19–29. DOI 10.17277/voprosy.2024.03.pp.019-029
 9. Effective cement binders on fly and slag waste from heat power industry of the Primorsky krai, Russian Federation / A. Taskin [et al.] // International Journal of Scientific and Technology Research. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 3509–3512.
 10. Luhar I.A Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer / I. Luhar, S. Luhar // Journal of Composites Science. – 2022. – Vol. 6. – № 8. – P. 219. DOI 10.3390/jcs6080219.
 11. Building materials and mineral binders based on hydrated ash and slag waste from coal-burning power plants and coal-enrichment waste / A.V. Taskin [et al.] // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. – 2023. – Vol. 14. – № 4. – P. 201–206. DOI 10.37614/2949-1215.2023.14.4.034.
 12. Biomass Briquettes Manufacturing Plant Cost, Setup Report 2025, Raw Material Requirements and Industry Trends – Researz. – URL : <https://www.imarcgroup.com/biomass-briquettes-manufacturing-plant-project-report> (date of application 30.08.2025).
 13. Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications / R. Khan [et al.] // RSC Advances (RSC Publishing). 2025 Apr 22; 15(16):12443–12471. DOI 10.1039/d4ra07601j
 14. Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer / Y. Ling [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – № 228. – 116763 p. – URL : <https://>

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116763

15. Detailed characterization of particle size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash / E. Loginova [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 207. – P. 866–874. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.022
16. Structure formation of composite materials for reinforcement of the earth bed / P.P. Pankov [et al.] // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2024. – № 4(784). – P. 103–116.
17. Improvement of Performances of the Gypsum-Cement Fiber Reinforced Composite (GCFRC). *Materials* / N. Chernysheva [et al.]. – 2020. DOI 10.3390/ma13173847

РОЛЬ КАВИТАЦИОННО АКТИВИРОВАННОГО ПЕРЛИТА В СОСТАВЕ ФОСФОГИПСОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ



THE ROLE OF CAVITATIONALLY ACTIVATED PERLITE IN PHOSPHOGYPSUM MIXTURES FOR 3D CONSTRUCTION PRINTING

Удодов Сергей Алексеевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный
технологический университет
udodov-tec@mail.ru

Белов Филипп Александрович

преподаватель-исследователь,
Кубанский государственный
технологический университет
belov_filip@mail.ru

Самандасюк Глеб Витальевич

преподаватель кафедры архитектуры
гражданских и промышленных зданий
им. А.В. Титова,
Кубанский государственный
технологический университет
gleb6730@gmail.com

Сусли Александр Алексеевич

соискатель кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный
технологический университет
udodov-tec@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено применению кавитационно активированного перлита для модификации гипсового вяжущего на основе фосфогипса – отхода производства удобрений. Гидродинамическая обработка увеличила удельную поверхность перлита с 180 до 15034 см²/г. Эксперименты показали, что замена до 15 % гипса активированным перлитом не снижает прочность при сжатии в 7-суточном возрасте, демонстрируя эффективное взаимодействие компонентов. Выявленный загущающий эффект от добавки ухудшает удобоукладываемость смеси, что требует введения суперпластификаторов. Результаты подтверждают перспективность использования активированного перлита для создания композитных вяжущих, в том числе для строительной 3D-печати.

Udodov Sergey Alekseevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
of the Department of Architecture
of Civil and Industrial Buildings
named after A.V. Titov,
Kuban State
University of Technology
udodov-tec@mail.ru

Belov Philip Alexandrovich

Teacher-researcher,
Kuban State
University of Technology
belov_filip@mail.ru

Samandasyuk Gleb Vitalievich

Lecturer of the Department
of Architecture of Civil
and Industrial Buildings
named after A.V. Titov,
Kuban State
University of Technology
gleb6730@gmail.com

Susla Alexandr Alekseevich

Candidate of the Department
of Architecture of Civil
and Industrial Buildings
named after A.V. Titov,
Kuban State
University of Technology
udodov-tec@mail.ru

Annotation. The study is devoted to the use of cavitationaly activated perlite for the modification of gypsum binder based on phosphogypsum, a waste product of fertilizer production. Hydrodynamic treatment increased the specific surface area of perlite from 180 to 15034 cm²/g. Experiments have shown that replacing up to 15 % of gypsum with activated perlite does not reduce compressive strength at the age of 7 days, demonstrating the effective interaction of the components. The revealed thickening effect of the additive worsens the workability of the mixture, which requires the introduction of superplasticizers. The results confirm the prospects of using activated perlite to create composite binders, including for structural 3D printing.

Ключевые слова: кавитация, активация, перлит, фосфогипс, строительная 3D-печать, тиксотропность, удельная поверхность.

Keywords: cavitation, activation, perlite, phosphogypsum, construction 3D printing, thixotropy, specific surface area.

Производство фосфорных удобрений сопряжено с получением значительного количества побочного продукта – фосфогипса. В подавляющем большинстве случаев этот отход не перерабатывается вторично и складировается во открытых отвалах, занимая территории и ухудшая экологическую обстановку в районе производства.

Одним из перспективных способов использования побочного фосфогипса – переработка его в воздушное гипсовое вяжущее. К настоящему моменту имеется обширный накопленный опыт получения из фосфогипса строительного гипса, пригодного для изготовления строительных материалов и изделий [1–5]. Вместе с тем, вопрос повышения прочностных характеристик получаемых вяжущих по-прежнему актуален.

Ранее авторами было показано положительное влияние на прочность вяжущего из побочного фосфогипса введение в состав гипса кремнеземсодержащих наполнителей [6]. Известно, что реакционная способность кремнеземсодержащих компонентов значительно возрастает с увеличением их удельной поверхности, аморфизации и активации поверхности. При этом кварцодержащие минеральные компоненты обладают повышенной твердостью, абразивной устойчивостью, ресурс- и энергоемкостью при измельчении. В этом смысле перспективными представляются методы активации в водной среде, при которых на материал оказывается сразу несколько воздействий: механическое, гидродинамическое, кавитационное.

Вопросу активации различных компонентов бетона, в том числе, благодаря кавитационным явлениям, возникающим во время гидродинамической обработки посвящено немало исследований [7–9]. Для измельчения вспученного перлита был применен гидродинамический диспергатор, совмещающий в себе все указанные выше виды воздействий (рис. 1). Вспученный перлит был выбран исходя из его минералогического состава (до 75 % диоксида кремния) и также высокопористой структуры, способной эффективно разрушаться в активаторе.

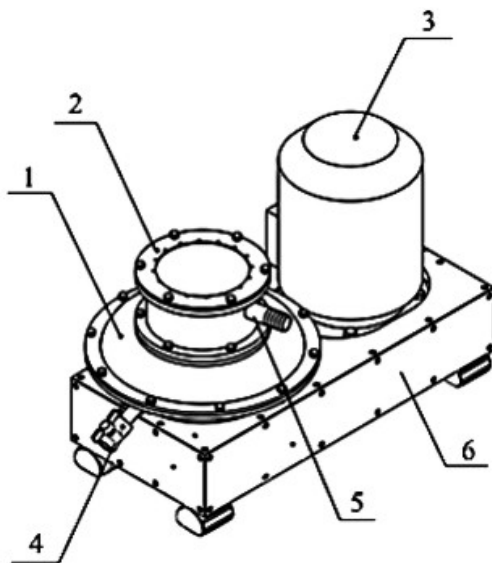


Рисунок 1 – Гидродинамический активатор роторного типа «Активатор GD»:

1 – рабочая камера, 2 – крышка камеры, 3 – электродвигатель (3 кВт),
4 – сливное отверстие, 5 – входное отверстие (для поточной кавитации), 6 – станина

Диспергация перлита проводилась в виде водной суспензии с массовым соотношением перлита к воде как 1:10. Время активации – 4 минуты, средняя скорость вращения ротора – 30 об/сек. Удельная поверхность и средний размер частиц перлита до и после активации, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Удельная поверхность и средний размер частиц перлита до и после активации

Материал	Удельная поверхность, см ² /г	Средний размер частиц, мкм
Вспученный перлит	180	450
Активированный перлит	15034	1,5

В результате кратковременного гидродинамического кавитационного воздействия средний размер частиц перлита уменьшился, а удельная площадь поверхности возрасла на два порядка.

Полученный активированный перлит в сухом виде добавлялся к гипсу α-модификации, полученному из фосфогипса автоклавным способом. Из полученного смешанного вяжущего, в котором гипс был замещен 5, 10 и 15 % (по массе) активированным перлитом. Водовязущее отношение (В/Вяз) принималось постоянным и равным 0,7. Изменение подвижности оценивалось с помощью стандартного цилиндра Суттарда по изменению диаметра расплыва теста. Влияние активированного перлита на прочность смешанного вяжущего при сжатии оценивалось в возрасте 7 суток. Такой возраст образцов был принят исходя из необходимости проявления структурообразующих свойств активированного перлита. Влажность образцов при испытании 8–9 % по массе. Результаты испытаний придставлены графически на рисунке 2.

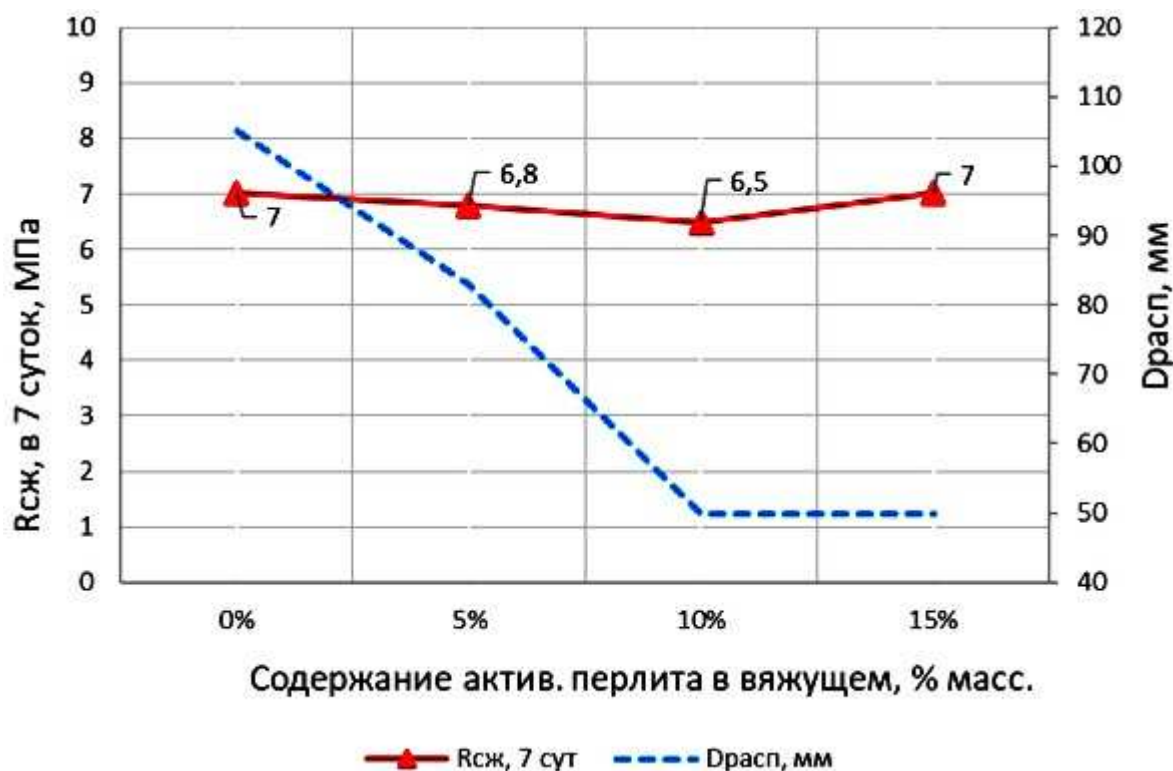


Рисунок 2 – Влияние доли активированного перлита в смешанном гипсовом вяжущем на подвижность смеси и прочность при сжатии в возрасте 7 суток

Из полученных данных следует, что замена части вяжущего на активированный перлит вплоть до 15 % включительно фактически не приводит к изменению прочностных характеристик в возрасте смешанного вяжущего 7 суток при неизменном значении В/Вяж. Это свидетельствует о наличии положительного физико-химического взаимодействия между гипсовой и перлитовой фазами в процессе структурообразования искусственного камня. Потенциально, долю активированного перлита, по-видимому, можно увеличивать без существенного ущерба для прочностных характеристик.

Вместе с тем, ввиду развитой поверхности активированного перлита, его введение в состав смешанного вяжущего влечет резкое снижение подвижности смеси, ухудшая ее технологические свойства. Этот негативный эффект, может быть, существенно снижен за счет использования сильных суперпластификаторов.

Выводы:

1. Использование явления гидродинамической кавитации при обработке материала в водной среде роторно-пульсационного аппарата позволяет эффективно измельчить вспученный перлит, увеличивая его удельную поверхность на два порядка.

2. Активированный перелит может быть рекомендован как активная минеральная добавка к α -модификации гипсового вяжущего, полученного из побочного фосфогипса. В составе смешанного вяжущего активированный перлит не снижает 7-суточную прочность при замене вяжущего до 15 %.

3. Загущающий эффект от введения активированного перлита может объясняться повышенной водопотребностью за счет развитой поверхности частиц, а также за счет проявления повышенного тикструпного загуствания ввиду пластинчатого характера его частиц.

Литература

1. Золотухин С.Н. Эффективные безобжиговые строительные материалы на основе фосфогипса / С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, А.А. Абраменко // Современное строительство и архитектура. – 2017. – № 4(08). – С. 8–14.
2. Ангидритовые вяжущие из фосфогипса и доломита / А.А. Сагындыков [и др.] // Механика и технологии. – 2022. – № 1(75). – С. 71–77.
3. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste / G. Bumanis [et al.] // Energy Procedia. – 2018. – № 147. – P. 301–308.
4. Garg M. Some aspects of the durability of a phosphogypsum-lime-fly ash binder / M. Garg, M. Singh, R. Kumar // Construction and Building Materials. – 1996. – № 4. – P. 274–279.
5. Dvorkin L. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results / L. Dvorkin, N. Lushnikova, M. Sonebi // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 149. P. 01012. – URL : <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901012>
6. Влияние кремнеземистых и кальциевых минеральных порошков на прочность и водопотребность гипсового вяжущего на основе фосфогипса / С.А. Удодов [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 130–133.
7. Гусев Б.В. Исследование эффективности использования кавитационной технологии для измельчения минеральных добавок / Б.В. Гусев, И.Г. Джагарян, Д.И. Оленич // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 4. – С. 297–300.

8. Гусев Б.В. Свойства бетона с использованием поликарбоксилатных добавок при кавитационной обработке / Б.В. Гусев, Д.И. Оленич, И.Г. Джагарян // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 3. – С. 239–242.
9. Гусев Б.В. Наноструктурирование бетонных материалов с применением кавитационных технологий / Б.В. Гусев; Уральское отделение Российской академии наук // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : тезисы докладов в пяти томах, Екатеринбург, 26–30 сентября 2016 года. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2016. – Т. 2а. – С. 265.

References

1. Zolotukhin S.N. Effective fire-free building materials based on phosphogypsum / S.N. Zolotukhin, O.B. Kukina, A.A. Abramenko // Modern construction and architecture. – 2017. – № 4(08). – P. 8–14.
2. Anhydrite binders from phosphogypsum and dolomite / A.A. Sagyndykov [et al.] // Mechanics and technology. – 2022. – № 1(75). – P. 71–77.
3. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste / G. Bumanis [et al.] // Energy Procedia. – 2018. – № 147. – P. 301–308.
4. Garg M. Some aspects of the durability of a phosphogypsum-lime-fly ash binder / M. Garg, M. Singh, R. Kumar // Construction and Building Materials. – 1996. – № 4. – P. 274–279.
5. Dvorkin L. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results / L. Dvorkin, N. Lushnikova, M. Sonebi // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 149. P. 01012. – URL : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901012>
6. The effect of silica and calcium mineral powders on the strength and water consumption of gypsum binder based on phosphogypsum / S.A. Udodov [et al.] // Nauka. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2023. – № 4. – P. 130–133.
7. Gusev B.V. Investigation of the effectiveness of using cavitation technology for grinding mineral additives / B.V. Gusev, I.G. Dzhangaryan, D.I. Olenich // Innovations and investments. – 2019. – № 4. – P. 297–300.
8. Gusev B.V. Properties of concrete using polycarboxylate additives during cavitation treatment / B.V. Gusev, D.I. Olenich, I.G. Dzhangaryan // Innovation and investment. – 2019. – № 3. – P. 239–242.
9. Gusev B.V. Nanostructuring of concrete materials using cavitation technologies / B.V. Gusev; Ural Branch of the Russian Academy of Sciences // XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry : abstracts in five volumes, Yekaterinburg, September 26–30, 2016. – Yekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. – Vol. 2a. – P. 265.

**БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАЛАКТЫРСКОГО
ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕСКА: ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ**



**CONCRETES USING KHALAKTYR VOLCANIC SAND: ENGINEERING
AND GEOLOGICAL FEATURES, PROPERTIES AND APPLICATION PROSPECTS**

Чернуха Данил Григорьевич

ассистент и аспирант кафедры строительного
материаловедения, изделий и конструкций,
Белгородский государственный технологический
университет имени В.Г. Шухова
callipso71@yandex.ru

Иванов Георгий Владимирович

студент кафедры строительного
материаловедения, изделий и конструкций,
Белгородский государственный технологический
университет имени В.Г. Шухова
callipso71@yandex.ru

Сорокин Максим Александрович

студент кафедры строительного
материаловедения, изделий и конструкций
Белгородский государственный технологический
университет имени В.Г. Шухова
callipso71@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуются свойства Халактырского песка – уникального природного материала, образовавшегося в результате вулканической деятельности на Камчатке. Анализируются его физико-механические характеристики, гранулометрический и минералогический состав, а также возможность использования в качестве мелкого заполнителя в бетонах. Приведены результаты лабораторных исследований, подтверждающие целесообразность применения данного песка в конструкционных и специализированных бетонах. Особое внимание уделено проблемам экологии и устойчивого развития при добыче песка.

Ключевые слова: вулканический песок, бетон, мелкий заполнитель, гранулометрический состав, прочность.

Chernukha Danil Grigorievich

Assistant and Postgraduate Student
of the Department of Building
Materials Science,
Products and Structures
Belgorod State Technological
University named After V.G. Shukhov
callipso71@yandex.ru

Ivanov Georgy Vladimirovich

Student of the Department
of Building Materials Science,
Products and Structures,
Belgorod State Technological
University named After V.G. Shukhov
callipso71@yandex.ru

Sorokin Maxim Alexandrovich

Student of the Department
of Building Materials Science,
Products and Structures,
Belgorod State Technological
University named After V.G. Shukhov
callipso71@yandex.ru

Annotation. The article examines the properties of Khalaktyr sand, a unique natural material formed as a result of volcanic activity in Kamchatka. Its physico-mechanical characteristics, granulometric and mineralogical composition, as well as the possibility of using it as a fine aggregate in concrete are analyzed. The results of laboratory studies confirming the expediency of using this sand in structural and specialized concretes are presented. Special attention is paid to the problems of ecology and sustainable development in sand mining.

Keywords: volcanic sand, concrete, fine aggregate, granulometric composition, strength.

Вулканический песок Камчатки, сосредоточенный преимущественно на Халактырском пляже, представляет собой уникальный природный ресурс, образовавшийся в результате активной вулканической деятельности полуострова. Его отличительной чертой является темный цвет, обусловленный высоким содержанием титаномагнетита и других минералов, таких как амфибо-

лы, пироксены и кварц. Этот песок обладает не только эстетической привлекательностью, но и особыми физическими свойствами, включая высокую плотность и магнитность [1].

Протяженность Халактырского пляжа составляет около 30–40 км, что делает его одним из крупнейших природных объектов такого типа в мире.

Песок здесь образовался благодаря размыву вулканических пород, выносимых реками из склонов близлежащих вулканов, таких как Авачинский и Козельский. Волны Тихого океана дополнительно измельчают и сортируют песчаные частицы, создавая однородную мелкозернистую структуру [2, 3].

В последние годы интерес к вулканическому песку Камчатки растет не только из-за его рекреационных и эстетических качеств, но и благодаря исследованиям его инженерно-геологических характеристик.

Минеральный состав Халактырского песка является прямым отражением его магматического происхождения. Доминирующую роль играют тёмноцветные железомagneзиальные минералы. Как показывают исследования рентгенофазового анализа и микроскопии, основными минералами-носителями являются: титаномагнетит – наиболее распространённый минерал, содержание которого может достигать 40-50% от массы тяжелой фракции. Именно он обуславливает выраженные магнитные свойства песка и его интенсивную чёрную окраску. Наличие титана в кристаллической решётке придает минералу повышенную химическую устойчивость; пироксены (авгит) и амфиболы (роговая обманка) – составляют значительную часть легкой фракции (до 20–25 %). Эти минералы характеризуются высокой прочностью, спайностью и угловатой формой зерен; кварц и полевые шпаты (плагиоклазы) – присутствуют в качестве примесей (до 15–21 %), являясь продуктом разрушения боковых пород или более древних магматических образований.

В незначительных количествах встречаются оливин, пирит, а также вкрапления вулканического стекла. Важной особенностью является практическое отсутствие глинистых минералов (каолинита, монтмориллонита) и органических примесей, что кардинально отличает его от многих других природных песков и является его ключевым преимуществом как заполнителя [4].

Гранулометрический (зерновой) состав является критически важной характеристикой для оценки пригодности песка в качестве мелкого заполнителя. Ситовой анализ, проведенный в соответствии с ГОСТ 12536-2014, демонстрирует высокую степень сортированности материала. Распределение фракций выглядит следующим образом: фракция 1.0 – 0.5 мм составляет основную массу материала – 43.8 %; фракция 0.5 – 0.25 мм является второй по значимости – 53.5 %; фракции крупнее 1 мм и мельче 0.25 мм (включая пылеватые и глинистые частицы) в сумме не превышают 2.7 %. Такой состав позволяет классифицировать Халактырский песок как песок средней крупности.

Морфология зёрен также имеет отличительные черты: частицы обладают угловатой и полуокатанной формой с шероховатой поверхностью, что является результатом комбинации абразивного воздействия морского прибоя и исходной формы обломков вулканических пород. Эта шероховатость в дальнейшем положительно сказывается на силе адгезии с цементным камнем.

Физические свойства Халактырского песка логично вытекают из его минерального состава и гранулометрии: истинная плотность зерен составляет 2.9 г/см³, что выше, чем у стандартного кварцевого песка (~2.65 г/см³). Это прямое следствие высокого содержания тяжелых минералов (магнетита, ильменита); насыпная плотность находится в диапазоне 1650 – 1750 кг/м³, что также несколько выше, чем у кварцевых аналогов, и должно учитываться при дозировании

нии по объёму; пористость и пустотность между зёрнами составляет около 40–42 %. Однако, благодаря однородному размеру зёрен, этот показатель является стабильным и может быть оптимально заполнен цементным тестом.

Коэффициент фильтрации имеет высокие значения (до 15–20 м/сутки), что характеризует материал как водопроницаемый и подтверждает отсутствие илистых и глинистых фракций, закупоривающих поры; водопоглощение самих зерен песка незначительно (менее 0.5 %) ввиду их плотной кристаллической структуры и отсутствия внутренних капилляров, характерных для осадочных пород.

Таким образом, комплексный инженерно-геологический анализ позволяет сделать вывод о том, что Халактырский вулканический песок является высококачественным монофракционным материалом с предсказуемыми свойствами, что создает серьезные предпосылки для его эффективного использования в производстве строительных материалов, в первую очередь – тяжёлых бетонов [5–9].

Проведённые лабораторные исследования позволили всесторонне оценить влияние частичной и полной замены традиционного кварцевого песка на Халактырский в составе бетонных композиций. Были подготовлены и испытаны серии образцов-кубов с размером ребра 150 мм с процентом замены 25 %, 50 %, 75 % и 100 %. В качестве контрольной серии использовался бетон на стандартном мытом кварцевом песке.

Результаты испытаний на прочность при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения выявили четкую тенденцию. Образцы с полной заменой заполнителя продемонстрировали прочность на сжатие в диапазоне 22.5 – 24.1 МПа, что соответствует марке бетона М300. Наибольшая прочность была зафиксирована в составе с 75 % заменой – до 25.8 МПа. Данный эффект объясняется оптимальным сочетанием собственной высокой плотности зерен Халактырского песка (около 2.9 г/см³) и их улучшенной адгезией к цементному камню благодаря шероховатой поверхности вулканического происхождения. Мономинеральность и однородность гранулометрического состава способствовали формированию более плотной и однородной структуры цементного камня, что минимизировало образование микродефектов и пор.

Важным показателем для эксплуатации в суровых климатических условиях Камчатского края является морозостойкость. Испытания по методике ГОСТ 10060-2012 показали, что все опытные образцы с применением Халактырского песка достигли марки по морозостойкости не менее F150. Такой результат обусловлен, прежде всего, низким водопоглощением самих зерен песка и, как следствие, снижением общего количества капиллярных пор в бетоне, которые являются основными проводниками влаги при попеременном замораживании и оттаивании.

Сравнительный анализ ключевых показателей бетонов на Халактырском и стандартном кварцевом песке выявил ряд существенных преимуществ и одно ограничение. К ключевым преимуществам можно отнести:

Повышенную прочность сцепления с цементным камнем: Шероховатая поверхность и угловатая форма частиц вулканического песка обеспечивают лучшее механическое сцепление по сравнению с окатанными гладкими зёрнами кварцевого песка аллювиального происхождения.

Экономия вяжущего: Для достижения равной проектной прочности (например, М300) бетону на Халактырском песке требуется на 5–7 % меньше цемента марки М500 благодаря его повышенной плотности и активности.

Экономическая целесообразность использования Халактырского песка обусловлена его локализацией и доступностью на территории Камчатского

края, где традиционные качественные кварцевые пески являются привозным материалом, что многократно увеличивает их стоимость. Использование местного сырья позволяет снизить логистические расходы и себестоимость строительства в регионе.

На основании полученных результатов можно выделить несколько наиболее перспективных направлений применения бетонов на основе Халактырского песка:

Дорожное и аэродромное строительство. Высокая прочность на сжатие и истираемость, а также отличная морозостойкость делают данный материал идеальным для устройства нижних и верхних слоев дорожных одежд, покрытий аэродромов, тротуарной плитки и бордюрного камня. Темный цвет покрытия может также способствовать более быстрому таянию снега за счет лучшего поглощения солнечного тепла.

Сейсмостойкое строительство. Для Камчатского края, региона с высокой сейсмической активностью, важность создания устойчивых конструкций невозможно переоценить. Повышенная плотность бетона на Халактырском песке (2000–2200 кг/м³) придает сооружениям большую массу и, следовательно, инерционность, что повышает их устойчивость к динамическим нагрузкам во время землетрясений.

Специализированные бетоны и защитные конструкции. Значительное содержание магнетита открывает потенциал для создания магнитоэкранирующих материалов для специализированных помещений (например, медицинских диагностических кабинетов с аппаратурой МРТ). Кроме того, повышенная плотность бетона может усиливать защитные свойства конструкций от ионизирующих излучений.

Массивные конструкционные элементы фундаментов и опор. Экономическая эффективность и высокие прочностные характеристики позволяют рекомендовать данный материал для широкого применения в фундаментостроении, возведении опор мостов и других ответственных конструкциях, где не предъявляются требований к декоративным свойствам бетона.

Таким образом, вулканический песок Халактырского месторождения является конкурентоспособным и эффективным местным строительным материалом для Камчатского края, использование которого способствует развитию региональной строительной индустрии и снижению ее зависимости от импортных заполнителей.

Литература

1. Геология СССР. Минеральные ресурсы Камчатки, Курильских и Командорских островов. – М. : Недра, 1977. – Т. 31. – 401 с.
2. Куликова Е.С. Минерально-сырьевые ресурсы Камчатского края и их использование в строительном комплексе / Е.С. Куликова, Е.А. Кривун // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 57. – С. 150–154.
3. Минерально-сырьевой потенциал Камчатской области / Г.П. Яроцкий [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КамГУ им. В. Беринга, 2007. – 23 с.
4. Панкратова К.В. Инженерно-геологические особенности песка Халактырского пляжа (Камчатка) / К.В. Панкратова, В.М. Ширинкина // Горная Промышленность «Юниор». – 2023. – № 4. – С. 1–4.
5. Ковальченко О.В. К вопросу о применении продуктов вулканической деятельности в строительном материаловедении / О.В. Ковальченко, Н.И. Алфимова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 6. – С. 24–28.

6. Алфимова Н.И. Продукты вулканической деятельности как сырьё для производства композиционных вяжущих / Н.И. Алфимова, П.В. Трунов // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 1. – С. 37–41.
7. Антонов В.А. Вулканогенные породы Северного Кавказа как сырьё для производства лёгких строительных материалов / В.А. Антонов, В.П. Лузин, Е.В. Беляев // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 1. – С. 40–45.
8. Вавренюк С.В. Гранулированный искусственный лёгкий заполнитель на основе вулканических пород Дальнего Востока // Academia. Архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 125–126.
9. Огнезащитные и жаростойкие композиты с применением вулканических горных пород / Х.А. Хежев [и др.]. // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 4. – С. 552–559.

References

1. Geology of the USSR. Mineral resources of Kamchatka, the Kuril and Commander Islands. – M. : Nedra Publ., 1977. – Vol. 31. – 401 p.
2. Kulikova E.S. Mineral resources of the Kamchatka Territory and their use in the construction complex / E.S. Kulikova, E.A. Krivun // Technical sciences – from theory to practice. – 2016. – № 57. – P. 150–154.
3. Mineral resource potential of the Kamchatka region / G.P. Yarotsky [et al.]. – Petropavlovsk-Kamchatsky : Publishing House of KamGU named after V. Bering, 2007. – 23 p.
4. Pankratova K.V. Engineering and geological features of the sand of the Khalaktyrsky beach (Kamchatka) / K.V. Pankratova, V.M. Shirinkina // Mining Industry «Junior». – 2023. – № 4. – P. 1–4.
5. Kovalchenko O.V. On the use of volcanic activity products in building materials science / O.V. Kovalchenko, N.I. Alfimova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – № 6. – P. 24–28.
6. Alfimova N.I. Products of volcanic activity as raw materials for the production of composite binders / N.I. Alfimova, P.V. Trunov // Dry building mixes. – 2012. – № 1. – P. 37–41.
7. Antonov V.A. Volcanogenic rocks of the North Caucasus as raw materials for the production of light building materials / V.A. Antonov, V.P. Luzin, E.V. Belyaev // Exploration and protection of the subsoil. – 2010. – № 1. – P. 40–45.
8. Vavrenyuk S.V. Granular artificial lightweight filler based on volcanic rocks of the Far East // Academia. Architecture and Construction. – 2012 – № 1. – P. 125–126.
9. Flame-retardant and heat-resistant composites using volcanic rocks / Kh.A. Hezhev // Engineering Bulletin of the Don. – 2011. – № 4. – P. 552–559.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы III Международной
научно-практической конференции
(15–16 октября 2025 г.)

Статьи публикуются в авторской редакции

Технический редактор – О.Я. Фоменко
Компьютерная верстка – М.Н. Гусева
Дизайн обложки – М.Б. Жаренко

Подписано в печать 31.10.2025
Бумага офсетная
Печ. л. 5,5
Усл. печ. л. 5,12
Уч.-изд. л. 4,6

Формат 60×84 ¹/₈
Печать трафаретная
Изд. № 1436
Тираж 100 экз.
Заказ № 2629

ООО «Издательский Дом – Юг»
350010, г. Краснодар, ул. Зиповская 9, литер «Г», оф. 41/3
тел. +7(918) 41-50-571

e-mail: id-yug@id-yug.com

Сайт: <https://id-yug.co>