

На правах рукописи



ГЛАЗКОВ РОМАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**ГИПСОСОДЕРЖАЩЕЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНОЕ ВЯЖУЩЕЕ
И МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА ЕГО ОСНОВЕ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Кожухова Наталья Ивановна

Официальные оппоненты: **Саламанова Мадина Шахидовна**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Грозненский государственный
нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова»,
профессор кафедры технологии
строительного производства

Пыкин Алексей Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный инже-
нерно-технологический университет», доцент
кафедры «Производство строительных
конструкций»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»

Защита состоится «15» сентября 2026 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Glazkov

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Денис Юрьевич Сулов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышение долговечности щелочеактивированных материалов и расширение области и объёмов их применения, является одной из ключевых задач, отвечающей «Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» (распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р) в части поиска и внедрения новых энергоэффективных материалов и снижения экологического прессинга от выделения диоксида углерода. Также особое значение, с учётом Стратегии инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года, имеет поиск путей снижения или полного отказа от природного сырья для производства и расширения спектра альтернативных видов строительных материалов и композитов.

В связи с этим актуальной задачей является изучение возможности получения шлакощелочных вяжущих с использованием гипсосодержащих промышленных отходов и бетонных композитов на их основе, позволяющих повысить долю вовлечения промышленных отходов как альтернативного ценного минерального сырья в производство бесклнкерных щелочеактивированных вяжущих атермального синтеза, а также улучшить эксплуатационные характеристики конечного продукта строительного назначения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Гос. Задания на создание лабораторий под руководством молодых исследователей по научной теме: «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), 2024–2026 гг.

Степень разработанности темы. Современный этап развития строительной науки характеризуется интенсивным изучением потенциала гипсосодержащих промышленных отходов в качестве вторичного минерального сырья. Научные исследования трансформировались от фундаментальных изысканий к практической реализации технологий, демонстрируя переход к парадигме экономики замкнутого цикла в строительной отрасли.

Одним из перспективных направлений утилизации данных отходов признано их вовлечение в состав щелочеактивированных вяжущих систем. Формируемые композиционные материалы сочетают высокие эксплуатационные характеристики с решением глобальных эколого-экономических задач.

Теоретической основой настоящего исследования послужили труды отечественных и зарубежных учёных, заложивших научные основы щелочной активации алюмосиликатов и применения техногенных гипсосодержащих ресурсов. Однако, ранее проведенные исследования посвящены изучению особенностей модифицирования шлакощелочных вяжущих природного гипса и фосфогипса, в связи с чем неизученными остаются принципы влияния на процессы структурообразования в рассматриваемой вяжущей системе других альтернативных гипсосодержащих компонентов, в частности, цитрогипса.

Цель и задачи работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего и мелкозернистого бетона на его основе.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- изучение вариативности генетически обусловленных характеристик металлургических шлаков и ее влияние на основные эксплуатационные свойства шлакощелочного вяжущего;

- изучение влияния компонентного состава и рецептурно-технологических параметров синтеза (вид и концентрация щелочного активатора; доля цитрогипса; термовлажностные условия твердения вяжущего) на физико-механические характеристики гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего (ГШЩВ);

- установление закономерностей фазо- и структурообразования ГШЩВ в зависимости от компонентного состава;

- разработка составов и технологических принципов производства ГШЩВ и мелкозернистого бетона на его основе;

- разработка комплекта нормативно-технической документации для практического внедрения фундаментальных и прикладных исследований. Опытно-промышленная апробация.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего с использованием цитрогипса и мелкозернистого бетона на его основе, заключающееся в совместной щелочной активации алюмосиликатного и гипсосодержащего компонентов с учетом совокупности генетических характеристик сырья: химического, фазово-минерального и гранулометрического составов, морфологических и физико-механических свойств металлургических шлаков и цитрогипса, их реакционной способности в условиях высокощелочной среды, природы щелочного активатора; а также в учете термовлажностных условий твердения вяжущей системы.

Установлен характер влияния цитрогипса при модифицировании шлакощелочного вяжущего на его структурообразование. Цитрогипс в составе шлакощелочной вяжущей системы в процессе взаимодействия с щелочным активатором выступает «поставщиком» SO_4^{2-} -анионов и Ca^{2+} -катионов, способствуя тем самым формированию дополнительных структурообразующих продуктов реакции: этtringита, тоберморита, C–S–H и C–A–S–H фаз. Щелочные активаторы проранжированы по степени увеличения эффективности их использования в составе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3$.

Установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно, количества и соотношения компонентов в гипсосодержащем шлакощелочном вяжущем (доменного гранулированного шлака, щелочного активатора, цитрогипса) и мелкого заполнителя (кварцевого песка) на физико-механические характеристики вяжущего и мелкозернистого бетона, позволяющие провести многокритериальную оптимизацию и установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов, дополняющие систему структурной методологии строительного материаловедения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Расширены теоретические представления о закономерностях влияния природы щелочного акти-

ватора на технологические параметры эффективных условий термовлажностной обработки и, как следствие, процесса твердения и формирования эксплуатационных характеристик конечных гипсосодержащих шлакощелочных композиций, расширяющие представления о направленном структуро- и фазообразовании в вяжущих системах щелочной активации.

Установлен эффект совместного действия щелочного активирующего агента и цитрогипса на динамику структурообразования и твердения шлакощелочного вяжущего, который проявляется в сокращении сроков начала и конца схватывания вяжущей системы.

Экспериментально доказана возможность синтеза ГШЩВ в разных термовлажностных условиях (н.у. и ТВО) с пределом прочности при сжатии 2,3–74,5 МПа; при изгибе 0,7–10,2 МПа; средней плотностью 1971–2384 кг/м³.

Дополнены теоретические представления о влиянии цитрогипса на характер и динамику усадочных деформаций в процессе твердения МЗБ на основе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего. Введение цитрогипса в своей оптимальной дозировке способствует снижению усадочных деформаций МЗБ до 10 раз в зависимости от природы щелочного активатора.

Разработаны составы мелкозернистого бетона на основе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего с показателями средней плотности 2000–2150 кг/м³, классами прочности на сжатие В10–В30, марками по морозостойкости F15–F50.

Предложена технология производства камней стеновых на основе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего с учетом генетических характеристик применяемых твердофазных сырьевых компонентов – доменного гранулированного шлака и цитрогипса, и используемых щелочных активаторов; эффективных технологических условий синтеза системы «доменный гранулированный шлак – цитрогипс – щелочной компонент», внедрение которой не требует существенного изменения в действующих производственных линиях по изготовлению мелкозернистого бетона и изделий на основе ПЦ.

Методология и методы исследования. Методологическая основа синтеза ГШЩВ и мелкозернистого бетона реализована посредством системного анализа взаимосвязи между генетическими характеристиками исходного сырья, формируемой структурой и эксплуатационными параметрами конечного композита. Экспериментальные исследования физико-механических характеристик сырьевых компонентов, вяжущего и мелкозернистого бетона выполнены в соответствии с нормативными методиками с применением аттестованного оборудования ЦКП «Центр высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова».

Комплексная оценка фазового и химического состава, микроструктуры и морфологии исследуемых материалов проведена с использованием сканирующей электронной микроскопии, РФА-анализа (рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового анализов), лазерной granulометрии, а также реологических моделей и закономерностей структурообразования.

Положения, выносимые на защиту:

– экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение ГШЩВ с использованием цитрогипса и мелкозернистого бетона на его основе;

- характер влияния цитрогипса при модифицировании шлакощелочного вяжущего на его структурообразование;
- закономерности влияния рецептурных факторов на физико-механические характеристики ГШЩВ и мелкозернистого бетона;
- особенности влияния цитрогипса на характер и динамику усадочных деформаций МЗБ на основе ГШЩВ;
- составы, свойства и технологические параметры синтеза ГШЩВ и мелкозернистого бетона;
- технология производства камней стеновых на основе разработанных составов гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего. Результаты апробации.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается: применением комплекса современных аналитических методов на сертифицированном метрологическом оборудовании, их корректной интерпретацией в рамках применения теоретических моделей и их экспериментальной верификацией. Эмпирические данные и теоретические положения согласуются с фундаментальными закономерностями материаловедения и подтверждены сопоставимостью с результатами независимых исследований, представленных в научной литературе.

Апробация результатов работы. Результаты работы представлялись на международных и всероссийских научно-технических конференциях, в Пензе (2023), Ярославле (2023), Архангельске (2025), Белгороде (2023, 2025), Москве (2023–2025), Томске (2023), Кемерово (2024), Омске (2023, 2024), Старом Осколе (2024, 2025), Саранске (2025), Белебее (Республика Башкортостан, 2025).

Внедрение результатов исследований. Подписан протокол о намерениях создания технологического комплекса по производству гипсосодержащих шлакощелочных вяжущих с ООО «ФИНТ»; осуществлена промышленная апробация основных результатов работы на предприятии ООО «ФИНТ» (г. Белгород). На полупромышленной установке получено ГШЩВ, выпущена партия камней стеновых на его основе.

Для внедрения результатов диссертационного исследования разработаны нормативные документы: стандарт организации СТО 02066339-092-2025 на вяжущее шлакощелочное гипсосодержащее; стандарт организации СТО 02066339-096-2025 на камни стеновые из вяжущего шлакощелочного гипсосодержащего; технологические регламенты на производство вяжущего шлакощелочного гипсосодержащего; камней стеновых из вяжущего шлакощелочного гипсосодержащего.

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленной апробации используются в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 – «Строительство» и 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов»; магистров по направлениям 08.04.01 – «Строительство», 28.04.03 – «Наноматериалы».

Публикации. Основные положения работы изложены в 16 публикациях, в том числе: 3 – в российских журналах, входящих в перечни рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в зарубежных изданиях,

индексируемых в базах Scopus и Web of Science (Q1 по Scopus). Получено 2 ноу-хау.

Личный вклад автора. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения цитрогипса – отхода от производства лимонной кислоты, для синтеза ГШЦВ и мелкозернистого бетона на его основе. Выполнен цикл экспериментальных изысканий: от планирования эксперимента до анализа результатов; сформулированы выводы и практические рекомендации по внедрению научно-обоснованных технологических решений, подтверждённые их опытно-промышленной апробацией.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста, включающего 31 таблицу, 38 рисунков, список литературы из 156 источников, 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одной из многообещающих и технологически доступных альтернатив портландцементу являются вяжущие вещества, получаемые методом щелочной активации. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества в вопросах получения и применения материалов щелочной активации, имеется ряд так называемых «серых зон», ограничивающих их более масштабное практическое внедрение, требующих более глубокого понимания и, поэтому, более детального изучения с целью реализации их более эффективного производства в технико-экономическом аспекте. Обзор научной литературы позволил выявить ключевые проблемы и основные направления исследований, касающиеся особенностей сырьевой базы, механизмов структурообразования, параметрических принципов консолидации вяжущей системы «металлургический шлак – щелочной активатор – вода», и на основании этого – технологий изготовления шлакощелочных вяжущих и мелкозернистых бетонов на их основе, а также вопросов разработки подходов и методов повышения их качества, улучшения и расширения спектра эксплуатационных характеристик (рис. 1).

В этом контексте следует отметить имеющийся эффективный опыт введения в шлакощелочные вяжущие системы различного рода вспомогательных компонентов как природного, так и техногенного происхождения с целью оказания модифицирующего действия на процессы структурообразования в вяжущей/бетонной матрице и, как следствие, влияния на формирование эксплуатационных параметров конечного продукта, среди которых, опираясь на результаты обзорного анализа, большой интерес среди отечественных и зарубежных учёных привлекают к себе гипсосодержащие компоненты.

В этой связи *рабочей гипотезой* данной работы стало предположение о технологической возможности получения гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего и мелкозернистого бетона на его основе с улучшенными технико-экономическими характеристиками за счет введения цитрогипса, который позволит регулировать сроки схватывания и снизить усадочные деформации при твердении вяжущей/бетонной системы.

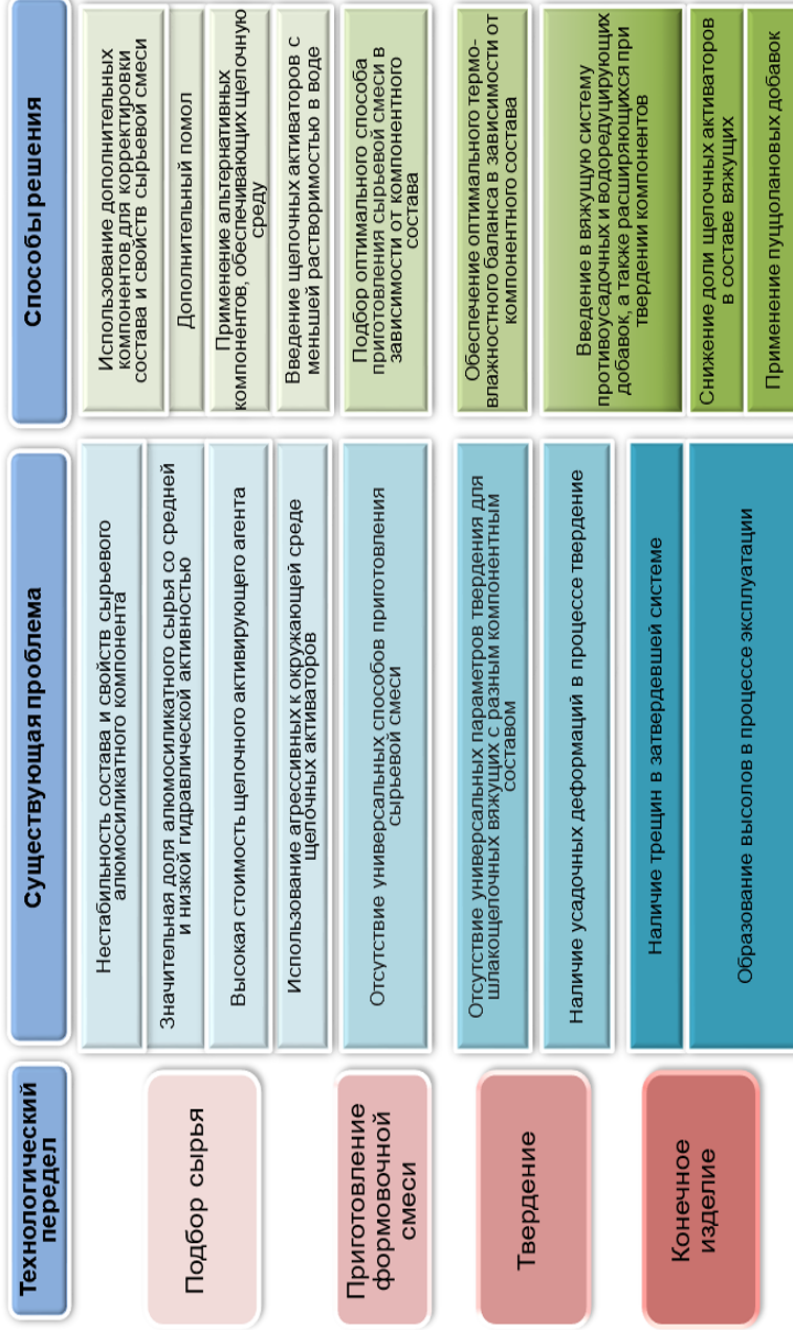


Рис. 1. Проблемы применения шлакощелочных вяжущих и способы их решения

Среди объектов исследования в качестве алюмосиликатной матрицы были использованы металлургические шлаки трех разных производителей: доменные гранулированные шлаки Новолипецкого металлургического комбината (г. Липецк) и Новотроицкого металлургического комбината АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, Оренбургская область), а также электрошлаеплавильный шлак Оскольского электрометаллургического комбината им. А.А. Угарова (ОЭМК, г. Старый Оскол, Белгородская область). В качестве щелочных активаторов были использованы NaOH, Na_2SiO_3 и Na_2CO_3 . В качестве гипсосодержащего компонента применялся цитрогипс (АО БЗЛК «Цитробел», г. Белгород, Россия).

Химический состав металлургических шлаков представлен достаточно высоким (> 50%) содержанием оксидов щелочноземельных металлов ($\text{CaO} + \text{MgO}$): 53,8%, 52,1% и 53,3% для шлаков Новолипецкого МК, Новотроицкого МК и ОЭМК соответственно. Концентрация оксидов щелочных металлов $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ не превышает 1,5%; содержание оксидов SiO_2 и Al_2O_3 находится в пределах 24,6–39,7% и 4,4–6,1% соответственно. Микроструктура частиц шлаков идентична как по дисперсности, так и морфологии (рис. 2).

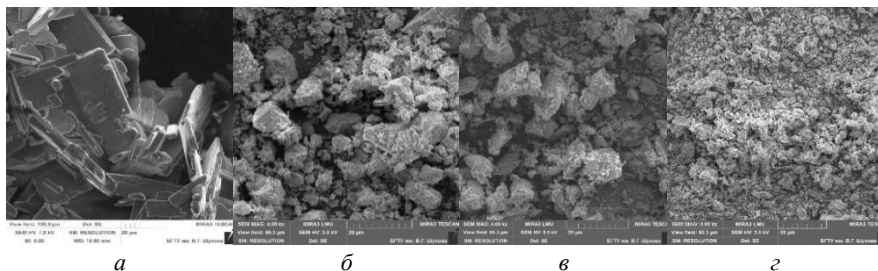


Рис. 2. Микроструктура сырьевых техногенных компонентов: *а* – цитрогипса; *б* – Новолипецкого доменного гранулированного шлака; *в* – Новотроицкого доменного гранулированного шлака; *г* – шлака ОЭМК

Количественный полнопрофильный РФА-анализ позволил установить наличие и концентрацию присутствующих в составе исследуемых металлургических шлаков рентгеноаморфной фазы и следующих кристаллических минеральных образований: мервинит, кальцит, кварц, окерманит, вюстит, магнетит. Рентгеноаморфная фаза для шлаков Новолипецкого МК и Новотроицкого МК варьируется в пределах 37,2–41,4%; для шлака ОЭМК – менее 5% (рис. 3).

Химический состав цитрогипса (ЦГ) в большей степени представлен оксидами CaO и SO_3 , которые в сумме составляют $\approx 99\%$. Частицы ЦГ имеют ярко выраженную пластинчатую морфологию (рис. 2 *а*).

На первом этапе исследования была оценена реакционная способность рассматриваемых металлургических шлаков и цитрогипса по отношению к воде, как показателя их гидравлической активности (рис. 4). Рассматриваемые шлаки демонстрируют разную реакционную способность по отношению к воде с тенденцией к увеличению этого параметра в следующей последовательности: шлак ОЭМК (3,11 МПа) → шлак Новотроицкого МК (6,44 МПа) → шлак Новолипецкого МК (7,93 МПа). Аналогичный последовательный

ряд отслеживается и в составах, содержащих добавку цитрогипса. Таким образом, шлак ОЭМК проявляет наименьшую гидравлическую активность среди рассматриваемых металлургических шлаков.

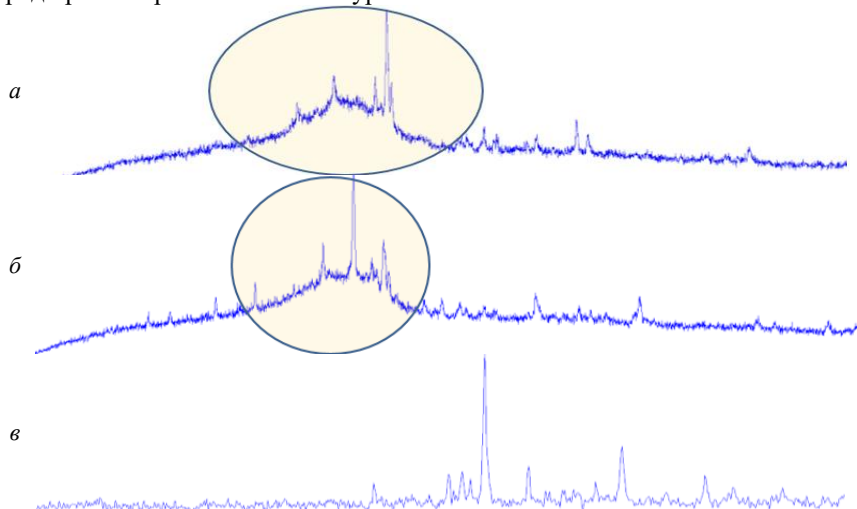


Рис. 3. РФА-профили исследуемых металлургических шлаков: *а* – Новолипецкого МК; *б* – Новотроицкого МК; *в* – ОЭМК. Овальным контуром выделены области гало, ответственные за наличие рентгеноаморфной фазы

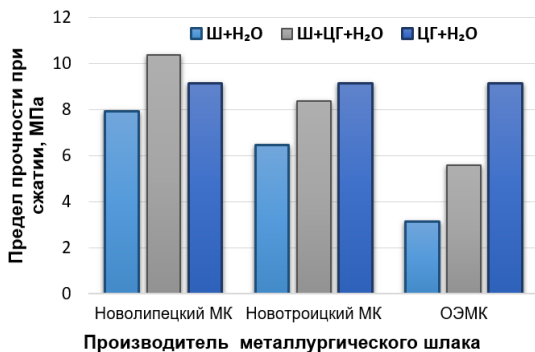


Рис. 4. Показатели гидравлической активности исследуемых техногенных отходов

Следующий этап исследования посвящен определению реакционной способности рассматриваемых металлургических отходов в условиях высокощелочной среды. Для реализации экспериментальной части этого исследования был использован обзорный анализ существующих и наиболее распространенных щелочных активирующих компонентов, применяемых в шлакощелочных вяжущих системах,

который лег в основу подбора активаторов для рассматриваемых шлаков по критерию прочности вяжущего: NaOH, Ca(OH)₂, Na₂SiO₃, Na₂CO₃. Результаты эксперимента позволили установить следующее: наиболее предпочтительным активатором для рассматриваемых доменных гранулированных шлаков выступает Na₂SiO₃ (84,5 МПа и 56,25 МПа) и NaOH (71,80 МПа и 60,73 МПа), а для электрометаллургического шлака ОЭМК – Na₂SiO₃ (54,3 МПа); наименьшую активирующую способность по отношению к трем представителям металлургических шлаков проявляет (Ca(OH)₂) с прочностью на

сжатие 3,89–11,90 МПа; наиболее высокую реакционную способность в щелочной среде проявляет шлак Новолипецкого МК, а наименьшую – шлак ОЭМК. В связи с этим, для дальнейшего проведения исследований в работе был использован доменный гранулированный шлак Новолипецкого МК.

С целью оценки потенциальной возможности применения ЦГ в качестве щелочного активатора в составе шлакощелочного вяжущего, на следующем этапе исследования было установлено влияние $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения в составе комплексного (многокомпонентного) щелочного активатора на показатели компрессионной прочности вяжущей системы «доменный гранулированный шлак – Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » путем варьирования содержания составляющих компонентов Na_2CO_3 и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ЦГ) (рис. 5). Установлено, что введение ЦГ приводит к снижению эффективной концентрации других Na^+ - и Ca^{2+} щелочных компонентов, что позволяет в перспективе рассматривать ЦГ как альтернативный щелочной активатор в шлакощелочных системах.

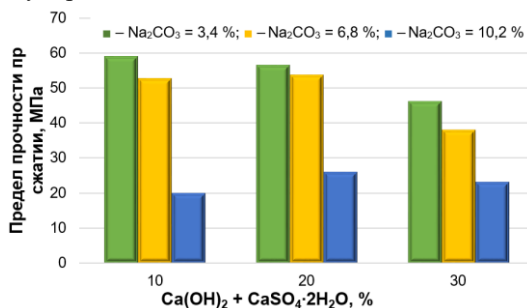


Рис. 5. Влияние $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения в комплексном щелочном активаторе на предел прочности при сжатии шлакощелочного вяжущего

Выявлена высокая значимость способа получения ГШЩВ на его прочностные характеристики. Наиболее высокие показатели прочности на сжатие демонстрирует вяжущее с использованием выдержанного в течение 24 часов щелочного раствора при использовании следующей последовательности смешивания сырьевых компонентов: шлак → ЦГ → щелочной раствор.

Определено влияние компонентного состава шлакощелочного вяжущего на его сроки схватывания (рис. 6): для вяжущей системы с чистым шлаком без щелочного активатора, при введении ЦГ сроки начала схватывания сокращаются в большей степени; в то время как сроки конца схватывания сокращаются в меньшей степени; совместное действие компонентов щелочного активатора и ЦГ способствует увеличению сроков схватывания (по сравнению с чистой вяжущей системой из цитрогипса) для вяжущих систем на основе эффективных щелочных активаторов NaOH и Na_2SiO_3 и сокращает сроки схватывания для системы, активированной Na_2CO_3 .

Ряд экспериментальных изысканий, проведенных в рамках работы, позволил установить, что при формировании структуры и свойств гипсосодержащего шлакощелочного композита в значительной мере играют следующие параметры: вид и концентрация щелочного активатора, дозировка цитрогипса.

В связи с этим на следующем этапе исследований была составлена мат-

рица планирования и разработан двухфакторный трехуровневый план эксперимента (табл. 1) для трех серий вяжущих систем, активированных разными щелочными компонентами (NaOH , NaSiO_3 , NaCO_3), с использованием факторов варьирования: концентрации щелочного активатора (%) и дозировка ЦГ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (%), которые являются определяющими, при выборе благоприятных условий твердения, а также формирования физико-механических особенностей консолидированных ГШЩВ.



Рис. 6. Влияние компонентного состава щелочеактивированных вяжущих на их сроки схватывания:
 1 – Ш; 2 – ЦГ; 3 – Ш+ЦГ; 4 – Ш+NaOH;
 5 – Ш+Na₂SiO₃; Ш+Na₂CO₃; Ш+ЦГ+NaOH;
 Ш+ЦГ+ Na₂SiO₃; Ш+ЦГ+ Na₂CO₃

поверхностей отклика и соответствующих им уравнений регрессий позволил выявить следующие закономерности: введение и увеличение дозировки ЦГ в составе вяжущей системы приводит к последовательному снижению показателей прочности, независимо от типа щелочного активатора; при использовании разных типов активирующего щелочного агента его оптимальная дозировка, обеспечивающая максимальные значения прочности на сжатие, варьируется в диапазоне концентраций 5,5–7,5% в зависимости от типа активатора. Рассчитанные на основании математической обработки коэффициенты достоверности аппроксимации демонстрируют значения $R^2=0,97-0,99$ (или 97–99 %), что свидетельствует об адекватности полученных уравнений регрессии.

Таблица 1. Условия планирования эксперимента

Факторы варьирования эксперимента		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Концентрация щелочного активатора, %	X_1	3	6	9	3
Дозировка ЦГ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), %	X_2	2	4	6	2

концентрация цитрогипса и рациональные дозировки щелочного активатора в зависимости от его природы: ГШЩВ, активированное NaOH: концентрация ЦГ – 4%, дозировка щелочи NaOH – 6,5%, условия твердения – н.у, ТВО; ГШЩВ, активированное NaSiO₃: концентрация ЦГ – 4,5%; дозировка щелочи

На основе статистической обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены зависимости, графическая интерпретация которых представлена в виде номограмм (рис. 7) для количественной оценки влияния варьируемых факторов на предел прочности при сжатии вяжущего, как выходного параметра.

Анализ полученных результатов на следующем этапе работы разработаны составы ГШЩВ. Определены наиболее благоприятные температурно-влажностные условия твердения. Выявлены: наиболее эффективная

NaSiO_3 – 6%, условия твердения – ТВО; ГШЩВ, активированное NaCO_3 : концентрация ЦГ – 3,5%, дозировка щелочи NaCO_3 – 7 %, условия твердения – ТВО. Разработанные составы ГШЩВ, обеспечивают показатели предела прочности при сжатии: 2,3–63,2 МПа (н.у.) и 62,1–74,5 МПа (ТВО); при изгибе: 0,7–9,7 МПа (н.у.) и 6,4–10,2 МПа (ТВО) (табл. 2).

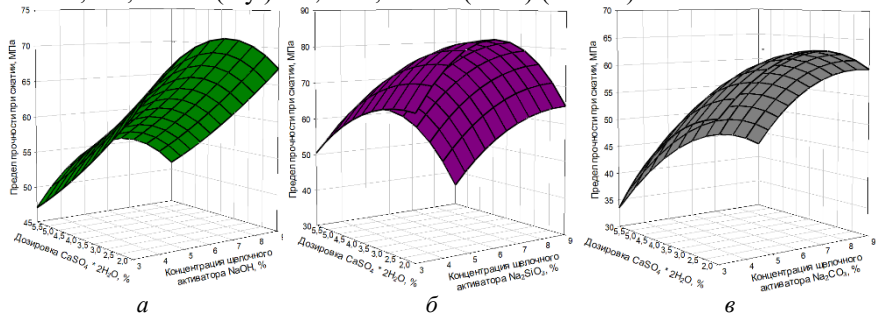


Рис. 7. Комплексное влияние концентрации щелочного активатора и дозировки $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ЦГ) на предел прочности при сжатии ГШЩВ, активированного: *а* – NaOH ; *б* – Na_2SiO_3 ; *в* – Na_2CO_3

Таблица 2. Состав и свойства ГШЩВ

№ п/п	Состав смеси вяжущего, %				Показатели для ГШЩ паст в зависимости от условий твердения					
					Средняя плотность, кг/м ³		Предел прочности при сжатии, МПа		Предел прочности при изгибе, МПа	
	Шлак	Активатор	ЦГ	Вода	н.у.	ТВО	н.у.	ТВО	н.у.	ТВО
Щелочной активатор – NaOH										
1	71,0	6,5	4,0	18,5	2236	2201	63,2	62,1	9,7	8,6
Щелочной активатор – Na_2SiO_3										
2	68,2	6,0	4,5	21,3	2005	2384	34,4	74,5	4,1	10,2
Щелочной активатор – Na_2CO_3										
3	70,2	7,0	3,5	19,3	1971	2209	2,3	60,7	0,7	6,4

Оценка реологических особенностей позволила установить, что природа активирующего щелочного агента и введение добавки цитрогипса оказывает весьма значительный эффект на показатели эффективной вязкости и формирование характера реологического течения относительно контрольного состава вяжущей смеси (рис. 8).

Установлен характер влияния ЦГ при модифицировании вяжущего на его структурообразование, заключающийся в том, что в процессе взаимодействия с щелочным активатором ЦГ выступает «поставщиком» SO_4^{2-} -анионов и Ca^{2+} -катионов, способствуя тем самым формированию дополнительных структурообразующих продуктов реакции: этtringита, тоберморита, С–S–Н и С–А–S–Н фаз.

Щелочные активаторы проранжированы по степени увеличения эффективности использования в составе ГШЩВ: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3$, что помимо физико-механических характеристик подтверждается увеличением доли продуктов структурообразования (рис. 9).

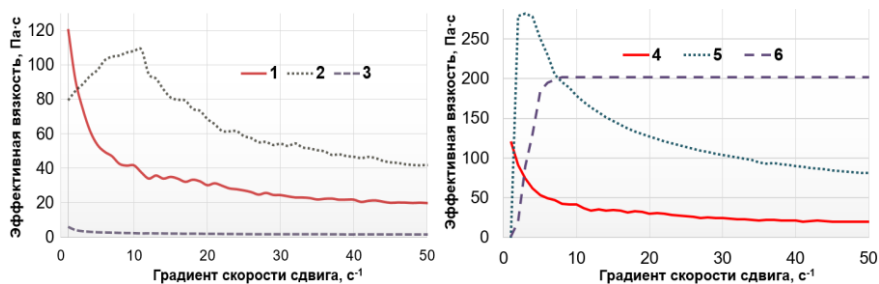


Рис. 8. Реологические кривые шлакощелочных вяжущих разного состава:
1, 4 – контрольная вяжущая система «Ш – H₂O»; 2 – «Ш – H₂O – ЦГ»;
3 – «Ш – H₂O – Na₂CO₃ – ЦГ»; 5 – «Ш – H₂O – NaSiO₃ – ЦГ»; 6 – «Ш – H₂O – NaOH – ЦГ»

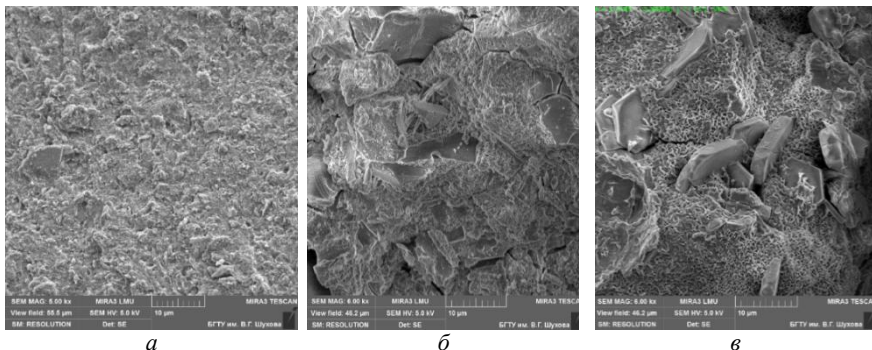


Рис. 9. Микроструктура ГШЩВ, активированного разными щелочными компонентами: а – Na₂CO₃, б – NaOH, в – Na₂SiO₃

На следующем этапе работы были разработаны составы мелкозернистого бетона на основе ГШЩВ с показателями средней плотности 2000–2150 кг/м³, классами прочности на сжатие В10–В30, марками по морозостойкости F15–F50 (табл. 3).

Таблица 3 – Рациональные составы и свойства МЗБ на основе на основе ГШЩВ

Шлак	ЦГ	Щелочной активатор			Песок	Вода	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Класс прочности на сжатие *	Марка по морозостойкости
		NaOH	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CO ₃						
28,2	1,6	2,6	–	–	59,6	10,6	2080	32,3	22,5	50
27,5	1,9	–	2,4	–	58,7	11,9	2150	43,2	>30	50
27,6	1,4	–	–	2,8	58,1	12,8	2000	13,9	10	15
Существующие аналоги										
Силикатный кирпич							1850–1940	–	>7,5	>15
Керамический кирпич							1600–1700		>7,5	>75
Камень стеновой цементный							2150–2250		>2,5	>15
Керамзитобетон							650–1450		>5	>50
Требования согласно ГОСТ 26633-2015							–		>2,5	>50

*Согласно ГОСТ 6133-2019, для камней стеновых из МЗБ: марка по прочности при сжатии – не менее 50, марка по морозостойкости – не менее 15.

Установлено, что введение добавки цитрогипса в своей оптимальной дозировке в исследуемые оптимальные композиции МЗБ по-разному влияет на характер усадочных деформаций, но, в целом, способствует их снижению до 10 раз в зависимости от природы щелочного активатора (рис. 10).

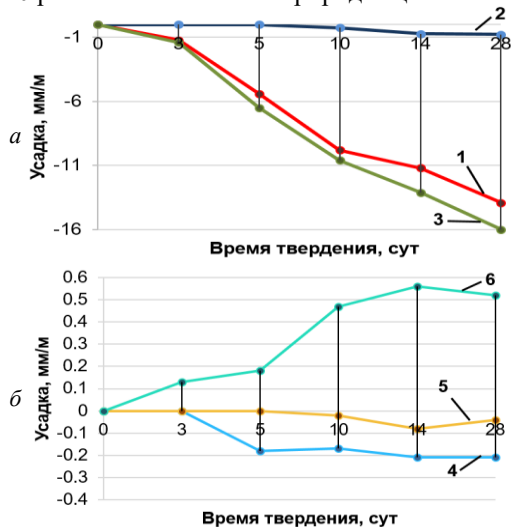


Рис. 10. Влияние состава МЗБ* на кинетику усадочных деформаций в процессе твердения: *a* – без ЦГ; *б* – с добавлением ЦГ

*Щелочной активатор, составы: 1, 4 – Na_2CO_3 ;
2, 5 – NaOH ; 3, 6 – Na_2SiO_3

Предложена технология производства камней стеновых на основе ГШЩВ с учетом генетических характеристик применяемых твердофазных сырьевых компонентов – доменного гранулированного шлака и цитрогипса, и используемых щелочных активаторов; эффективных технологических условий синтеза системы «доменный гранулированный шлак – цитрогипс – щелочной компонент», внедрение которой не требует существенного изменения в действующих линиях по изготовлению мелкозернистого бетона и изделий на основе ПЦ. Для внедрения в производственный процесс предложенных составов ГШЩВ и мелкозернистого бетона была

разработана необходимая нормативная документация: технологические регламенты, стандарты организации.

Опытно-промышленная апробация предложенных научно-обоснованных технологических решений осуществлялась на базе предприятия ООО «ФИНТ» (производство камней стеновых); подписан протокол о намерениях с ООО «ФИНТ». Снижение материальных затрат на производство МЗБ на основе ГШЩВ по сравнению с МЗБ на основе ПЦ составило от 213 до 252 %, в зависимости от типа применяемого щелочного активатора. Технико-экономическая эффективность обусловлена более низкой энергоемкостью технологического процесса, а также расширением сырьевой базы для производства строительных материалов за счет вовлечения более дешевого, но качественного сырья в виде крупнотоннажных промышленных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение гипсо-содержащего шлакощелочного вяжущего с использованием цитрогипса и мелкозернистого бетона на его основе, заключающееся в совместной щелочной активации алюмосиликатного и гипсо-содержащего компонентов с учетом совокупности генетических характеристик сырья: химического, фазово-

минерального и гранулометрического составов, морфологических и физико-механических свойств металлургических шлаков и цитрогипса, их реакционной способности в условиях высокощелочной среды, природы щелочного активатора; а также в учете термовлажностных условий твердения вяжущей системы.

Установлен характер влияния цитрогипса при модифицировании шлакощелочного вяжущего на его структурообразование. Цитрогипс в составе шлакощелочной вяжущей системы в процессе взаимодействия с щелочным активатором выступает «поставщиком» SO_4^{2-} -анионов и Ca^{2+} -катионов, способствуя тем самым формированию дополнительных структурообразующих продуктов реакции: этtringита, тоберморита, C–S–H и C–A–S–H фаз. Щелочные активаторы проражированы по степени увеличения эффективности их использования в составе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3$.

Установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно, количества и соотношения компонентов в гипсосодержащем шлакощелочном вяжущем (доменного гранулированного шлака, щелочного активатора, цитрогипса) и мелкого заполнителя (кварцевого песка) на физико-механические характеристики вяжущего и мелкозернистого бетона, позволяющие провести многокритериальную оптимизацию и установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов, дополняющие систему структурной методологии строительного материаловедения.

Расширены теоретические представления о закономерностях влияния природы щелочного активатора на технологические параметры эффективных условий термовлажностной обработки и, как следствие, процесса твердения и формирования эксплуатационных характеристик конечных гипсосодержащих шлакощелочных композитов, расширяющие представления о направленном структуро- и фазообразовании в вяжущих системах щелочной активации.

Установлен эффект совместного действия щелочного активирующего агента и цитрогипса на динамику структурообразования и твердения шлакощелочного вяжущего, который проявляется в сокращении сроков начала и конца схватывания вяжущей системы.

Экспериментально доказана возможность синтеза ГШЩВ в разных термовлажностных условиях (н.у. и ТВО) с пределом прочности при сжатии 2,3–74,5 МПа; при изгибе 0,7–10,2 МПа; средней плотностью 1971–2384 кг/м³.

Дополнены теоретические представления о влиянии цитрогипса на характер и динамику усадочных деформаций в процессе твердения МЗБ на основе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего. Введение цитрогипса в своей оптимальной дозировке способствует снижению усадочных деформаций МЗБ до 10 раз в зависимости от природы щелочного активатора.

Разработаны составы мелкозернистого бетона на основе гипсосодержащего шлакощелочного вяжущего с показателями средней плотности 2000–2150 кг/м³, классами прочности на сжатие В10–В30, марками по морозостойкости F15–F50.

Предложена технология производства камней стеновых на основе гипсо-

содержащего шлакощелочного вяжущего с учетом генетических характеристик применяемых твердофазных сырьевых компонентов – доменного гранулированного шлака и цитрогипса, и используемых щелочных активаторов; эффективных технологических условий синтеза системы «доменный гранулированный шлак – цитрогипс – щелочной компонент», внедрение которой не требует существенного изменения в действующих производственных линиях по изготовлению мелкозернистого бетона и изделий на основе ПЦ.

Для внедрения предложенных научно-обоснованных технологических решений синтеза ГШЩВ и производства мелкозернистого бетона разработаны соответствующие нормативные документы: стандарты организации и технологические регламенты. Подписан протокол о намерениях с ООО «ФИНТ», осуществлена опытно-промышленная апробация на базе промышленного предприятия ООО «ФИНТ» по производству камней стеновых.

Технико-экономическая эффективность МЗБ на основе ГШЩВ по сравнению с МЗБ на основе ПЦ составила от 213 до 252 %, в зависимости от типа применяемого щелочного активатора, что обусловлено более низкой энергоемкостью технологического процесса, а также расширением сырьевой базы для производства строительных материалов за счет вовлечения более дешевого, но качественного сырья в виде крупнотоннажных промышленных отходов.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для использования: в синтезе гипсосодержащих шлакощелочных вяжущих разного компонентного состава, а также при производстве изделий из мелкозернистого бетона, ориентированных для применения в промышленном и гражданском строительстве; в образовании – в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров

Перспективы дальнейших исследований следует рассматривать в аспекте расширения техногенной гипсосодержащей сырьевой базы для строительных композиций на основе бесклинкерных минеральных вяжущих щелочной активации в рамках системного подхода к эксплуатационным требованиям и технологическим параметрам синтеза.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В отечественных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ¹

1. **Глазков, Р.А.** Характеристики шлакощелочного вяжущего с использованием комплексного активатора с гипсосодержащим отходом / Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова, Л.Н. Бецман, И.В. Жерновская // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2026. – № 1. – С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19 **К1, УБС 2**

2. **Глазков, Р.А.** Влияние способа получения шлакощелочного вяжущего

¹ С учетом индексирования в международных базах данных, категорирования (приравнивание согласно рекомендации Президиума ВАК № 30/1-разн. от 24.11.2023), уровня белого списка (УБС)

на его физико-механические характеристики / Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. № 2. – С. 68–76. DOI: 10.54734/20722958_2025_2_68. **KI, RSCI, УБС 2**

3. *Кожухова, Н.И.* Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах / Н.И. Кожухова, **Р.А. Глазков**, А.И. Коломыцева, И.С. Никулин, А.В. Череватова // Строительные материалы. – 2023. – № 10. – С. 47–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51 **KI, RSSCI, УБС 2**

В зарубежных рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, приравненных к K1–K2

4. *Kozhukhova, N.I.* Physical, Mechanical and Microstructural Characteristics of Perlite-Based Geopolymers Modified with Mineral Additives / N.I. Kozhukhova, **R.A. Glazkov**, M.S. Ageeva, M.I. Kozhukhova, I.S. Nikulin, I.V. Zhernovskaya // Journal of Composites Science. – 2024. – Vol. 8. – 211. DOI: 10.3390/jcs8060211 (**Scopus – Q1, WoS – Q2**), **УБС 2, KI**

5. *Kozhukhova, N.I.* The Effect of Recycled Citrogypsum as a Supplementary Mineral Additive on Physical and Mechanical Performance of Granulated Blast Furnace Slag-Based Alkali-Activated Binders / N.I. Kozhukhova, N.I. Alfimova, M.I. Kozhukhova, I.S. Nikulin, **R.A. Glazkov**, A.I. Kolomytceva // Recycling. – 2023. – Vol. 8(1) – 22. DOI: 10.3390/recycling8010022 (**Scopus – Q1, WoS – Q2**), **УБС 2, KI**

В сборниках трудов конференций и иных изданиях

6. *Глазков, Р.А.* Гипсосодержащий отход как щелочной активатор шлакощелочного вяжущего / Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова, Л.Н. Боцман // Строительное материаловедение: настоящее и будущее: сборник материалов IV Всероссийской научной конференции (г. Москва, 13–14 ноября 2025 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Институт строительства и архитектуры, кафедра строительного материаловедения. – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2026. – С. 76–80. ISBN 978-5-7264-3784-2

7. *Глазков, Р.А.* Модифицирование шлакощелочного вяжущего цитрогипсом разными способами его введения / Р.А. Глазков, Д.С. Чалов // Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий: материалы XII международной научно-практической конференции, (г. Саранск, 10–11 сентября, 2025 г.). – Москва: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2025. – С. 81–83. ISBN 978-5-7264-3695-1

8. Чалов, Д.С. Оценка эффективности существующих способов борьбы с усадочными деформациями в щелочеактивированных системах / Д.С. Чалов, **Р.А. Глазков**, Д.Г. Кикалишвили // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: материалы XI международной научно-практической конференции, приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева, г. Омск, 21–22 ноября, 2024. – Омск: СибАДИ, 2025. – С.423–426.

9. *Глазков, Р.А.* Изучение феномена высолообразования в шлакощелочных вяжущих системах / Р.А. Глазков, Д.С. Чалов // Сборник материалов XV

Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая», г. Кемерово, 16–19 апреля 2024. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, 2024 г. – № 073706

10. **Глазков, Р.А.** Анализ методов неразрушающего контроля качества бетонных изделий / Р.А. Глазков, А.И. Коломыцева, А.В. Череватова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник VIII международной научно-практической конференции, г. Омск, 30 ноября 2023. – Омск: СибАДИ, 2023. – С 520–526.

11. **Глазков Р.А.** Изучение усадочных деформаций в щелочеактивированных вяжущих разного состава / Р.А. Глазков // Наукоемкие технологии и инновации» (XXV научные чтения): сборник международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, г. Белгород, 23 ноября 2023. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С 453–457.

12. **Глазков, Р.А.** Влияние состава шлакощелочных вяжущих на условия твердения / Р.А. Глазков, А.И. Коломыцева // Строительное материаловедение: настоящее и будущее: сборник III Всероссийской научной конференции, г. Москва, 15–16 ноября 2023 г. – Москва: НИУ МГСУ, 2023. – С. 95–99.

13. **Глазков, Р.А.** Уникальные свойства щелочеактивированных материалов как перспектива их применения в современном строительстве / Р.А. Глазков, А.И. Коломыцева // Сборник материалов Семьдесят шестой всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Том 2, г. Ярославль, 19–20 апреля 2023 г. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет 2023. – С. 274–277.

14. Коломыцева, А.И. Изучение агрессивного воздействия шлакощелочных вяжущих / А.И. Коломыцева, **Р.А. Глазков**, А.В. Череватова // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства: сборник трудов VI Национальной научно-практической конференции, Пенза, 30-31 марта 2023 г. – Пенза: ПГУАС 2023. – С. 13–16.

Объекты интеллектуальной собственности

15. Ноу-хау № 20230015 Шлакощелочное вяжущее / Коломыцева А.И., **Глазков Р.А.**, Кожухова Н.И., Войтович Е.В. Правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; Зарегистрировано 11.09.2023 г. – 4 с.

16. Ноу-хау № 20230016 Шлакощелочное вяжущее / **Глазков Р.А.**, Коломыцева А.И., Кожухова Н.И., Войтович Е.В. Правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; Зарегистрировано 11.09.2023 г. – 4 с.

ГЛАЗКОВ РОМАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**ГИПСОСОДЕРЖАЩЕЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНОЕ ВЯЖУЩЕЕ
И МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА ЕГО ОСНОВЕ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.05.2026
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,19. Тираж 120 экз. Заказ № 64

Отпечатано в БГТУ им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46