

На правах рукописи



ЕРМАКОВ Анатолий Анатольевич

**ПОРИСТЫЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ И КРЕМНИСТЫХ ПОРОД**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
РОДИН Александр Иванович

Официальные оппоненты:

КОТЛЯР Владимир Дмитриевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»,
кафедра «Строительные материалы»,
заведующий кафедрой

ЧУМАЧЕНКО Наталья Генриховна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
кафедра «Производство строительных
материалов, изделий и конструкций»,
профессор кафедры

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород**

Зашита диссертации состоится 19 февраля 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/123-0124-yermakov-anatoly-anatolyevich>.

Автореферат разослан 19 декабря 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Снежкина Ольга Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современном промышленном и гражданском строительстве все большее значение приобретают теплоизоляционные материалы, способные эффективно выполнять свои функции сбережения энергетических ресурсов. В наибольшей степени всему комплексу предъявляемых требований по своим теплофизическим, противопожарным и эксплуатационным свойствам удовлетворяет пеностекло, которое обладает относительно высокой механической прочностью, стойкостью в воде, химических и биологических агрессивных средах, низким коэффициентом теплопроводности, а также является экологически чистым и негорючим.

Технология производства пеностекла в настоящее время представляет собой очень сложный и затратный процесс. На первом этапе производят варку стекла. Затем остывшее стекло размалывают с газообразующими добавками и повторно нагревают с последующим отжигом полученного материала. Все это влечет за собой высокую себестоимость пеностекла – основную причину, по которой данный материал не может конкурировать с традиционными изоляционными материалами, такими как: минеральная вата, пенополистирол и пенополиуретан. Поэтому, использование пеностекла в строительной отрасли могут себе позволить лишь очень крупные компании, а также предприятия военно-промышленного комплекса. В то же время, строительная отрасль и промышленность в целом испытывают острую потребность в долговечных, эффективных и безопасных теплоизоляционных материалах.

Перспективным направлением в промышленности пеностекла является применение более дешевого сырья, снижение энергозатрат при производстве, улучшение физико-механических, теплофизических и других эксплуатационных свойств, расширяющих область применения конечной продукции.

Диссертационная работа выполнена в рамках НИР:

- грант РНФ № 18-73-00213 «Разработка и внедрение энергоэффективных экологически чистых строительных материалов на основе кремнеземсодержащих пород и добавок отечественного производства за один нагрев исходного сырья, стойких в условиях агрессивного воздействия химических и биологических сред, повышенных температур и переменной влажности» (руководитель – Родин А.И., исполнитель – Ермаков А.А., 2019–2020 гг.);

- грант РНФ № 21-79-10422 «Разработка и внедрение энергоэффективных экологически чистых строительных материалов с высокой максимальной температурой эксплуатации, термической и химической стойкостью, полученных на основе кремнистых и карбонатных пород и добавок отечественного производства за один нагрев исходного сырья» (руководитель – Родин А.И., основной исполнитель – Ермаков А.А., 2021–2024 гг.);

- грант Фонда содействия инновациям № 18310ГУ/2023 «Разработка пористых стеклокерамических материалов на основе кремнеземсодержащих пород посредством модификации шихты алюмосиликатными составляющими» УМНИК (исполнитель – Ермаков А.А., 2022 г.);

- грант Фонда содействия инновациям № 5260ГС1/101600 «Разработка рецептур и двухстадийной технологии производства пористой стеклокерамики на

основе кремнистых пород» Старт-Взлёт (руководитель – Родин А.И., основной исполнитель – Ермаков А.А., 2024–2025 гг.);

Степень разработанности темы

Получению пористых стеклокерамических материалов из кремнистых и цеолитсодержащих пород посвящены работы Казанцевой Л.К., Казьминой О.В., Верещагина В.И., Котляра В.Д., Берегового В.А., Маневича В.Е., Иванова К.С., Кетова П.А., Никитина А.И., Жималова А.А., Соколовой С.Н., Fernandes H.R., König J., Hisham N.A.N., Zeng L., Zhu M. и мн. др.

В ходе проведенного литературного обзора установлено, что наиболее применяемой является двухстадийная технология получения стеклокерамики с равномерной пористой структурой из цеолитсодержащих и кремнистых пород. На первом этапе производят варку стекла, а затем остывшее стекло размалывают с газообразующими добавками и повторно нагревают. С целью снижения себестоимости производства пеностекла и пористой стеклокерамики разработан одностадийный метод, основанный на щелочной активации компонентов шихты. При данном способе цеолитсодержащие и кремнистые породы смешивают с водным раствором NaOH высокой концентрации, гранулируют и обжигают. Данная технология имеет ряд недостатков: быстрый износ оборудования в результате воздействия щелочей, выделение вредных веществ в атмосферу, сложность получения строительных материалов в форме блоков.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является разработка научно-обоснованного технологического решения получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты, отличающихся высокими физико-механическими, теплофизическими, гидрофизическими свойствами, а также относительно низкой себестоимостью производства.

Задачи исследований:

1. Выполнить анализ отечественной и зарубежной литературы и имеющийся практический опыт в области технологии получения теплоизоляционных строительных материалов на основе пеностекла и пористой стеклокерамики и, с учетом этого, выбрать направление исследований;

2. Изучить особенности влияния вида и продолжительности механической активации на форму и размер частиц шихты, а также на изменение ее фазового состава;

3. Разработать методику для контроля помола шихты, позволяющую получать образцы пористой стеклокерамики с заданными свойствами;

4. Изучить особенности фазовых превращений, происходящих в шихте при нагревании на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород, модифицированной добавками отечественного производства;

5. Установить количественные зависимости в системе состав–технология–структура–свойства для разрабатываемых пористых стеклокерамических материалов от содержания составляющих компонентов шихты, особенностей ее механоактивации и термообработки, позволяющие получить строительные материалы с заданными свойствами;

6. Установить влияние фазового состава пористой стеклокерамики на ее химическую и биологическую стойкость;

7. Определить морозостойкость и звукопоглощающие свойства образцов пористой стеклокерамики;

8. Подобрать составляющие компоненты для получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород с учетом требуемых физико-механических показателей;

9. Разработать технологию получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты, а также оптимизировать составы компонентов шихты по основным физико-механическим, теплофизическим, гидрофизическими показателям, а также себестоимости производства;

10. Разработать рекомендации, апробировать разработанную технологию и составы для получения пористой стеклокерамики с использованием промышленного оборудования;

11. Выполнить расчеты и обосновать технико-экономическую эффективность от производства и применения пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих и кремнистых пород по разработанной технологии по сравнению с существующими аналогами.

Объектом исследования являются пористые стеклокерамические строительные материалы на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород.

Предметом исследования являются свойства пористых стеклокерамических строительных материалов, модифицированных различными добавками.

Научная новизна работы определяется разработанными новыми подходами в технологии изготовления пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород, позволяющими снизить энергоемкость производства стеклокомпозитов с высокими физико-механическими, теплофизическими, эксплуатационными свойствами, а также относительно низкой себестоимостью производства, заключающейся в сверхтонком совместном помоле цеолитсодержащих и кремнистых пород, плавня (кальцинированная сода, термонатрит) и различных добавок (хлориды, алюмосиликаты, кальцийсодержащие, магнийсодержащие и другие) с последующим одностадийным обжигом до температуры не более +850 °C.

Установлены качественно новые закономерности изменения формы частиц шихты, фазового состава и удельной поверхности от вида и продолжительности механической активации: размер кристаллитов кальцита уменьшается до менее 50 нм; удельная поверхность шихты сначала увеличивается, а затем уменьшается; образуются агрегаты сферической формы.

Раскрыты механизмы действия добавок (хлоридов, алюмосиликатов, кальцийсодержащих, магнийсодержащих и других) на процессы, происходящие при формировании пористой структуры стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород. При температуре ≈+400 °C в шихте начинается силикатообразование. При температурах обжига до ≈+680 °C у бездобавочного состава завершается спекание образцов шихты, а с кальцитом и добавками процесс завершается при температуре на 20 °C меньше. Дальнейшее

увеличение температуры обжига приводит к размягчению аморфной фазы и вспениванию шихты.

Изложены доказательства вспенивающей роли водяного пара, конденсируемого из гидроксильных групп гидрослюд и глинистых минералов, и добавок на температурные интервалы вспенивания и кристаллизации шихты, а также фазовый состав образцов пористой стеклокерамики (из шихты без кальцита и добавок получена аортоклазовая пористая стеклокерамика, из пород с кальцитом – волластонитовая и волластонито-комбейтовая стеклокерамики; при введении в состав шихтовой смеси магнийсодержащих добавок кристаллизуется диопсидовая стеклокерамика).

Изучены основные зависимости в системе состав–технология–структура–свойства пористых стеклокерамических материалов на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород и добавок отечественного производства от содержания его составляющих компонентов, особенностей механической активации шихты и ее термообработки, позволившие выявить ранее неизвестные закономерности исследуемых явлений и получить на их основе строительные материалы нового поколения.

Получены новые результаты стойкости и долговечности пористых стеклокерамических материалов на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород и добавок отечественного производства в водных растворах кислот и щелочей различной концентрации, в условиях циклически действующих температур и переменной влажности, в стандартных средах мицелиальных грибов, определяющие перспективы диссертационного исследования на практике.

Теоретическая значимость работы

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения стеклокерамических материалов за счет сверхтонкого совместного помола цеолитсодержащих и кремнистых пород, плавня и различных добавок с последующим одностадийным обжигом.

Изложены доказательства, вносящие вклад в расширение представлений о процессах, происходящих при формировании структуры стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород, расширяющие границы применимости полученных результатов.

Раскрыты новые закономерности проявления взаимосвязи состава, структуры и свойств цеолитсодержащих и кремнистых пород с технологическими процессами их активации, влияющие на свойства стеклокерамических материалов.

Доказаны перспективы использования комплекса добавок в составе стеклокерамических материалов, позволяющих улучшить их структуру и свойства по сравнению с ранее полученными другими авторами прототипами.

Практическая значимость работы

Разработана технология получения пористых стеклокерамических материалов нового поколения, базирующаяся на совместном помоле цеолитсодержащих и кремнистых пород, плавня (кальцинированная сода, термонатрит) и различных добавок (хлориды, алюмосиликаты, кальцийсодержащие, магнийсодержащие и

другие) с последующим одностадийным обжигом до температуры не более +850 °С, обеспечивающая получение новых результатов.

Разработаны и предложены оптимальные составы компонентов для получения пористых стеклокерамических материалов на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород и кальцинированной соды с кажущейся плотностью 140–410 кг/м³, пределом прочности при сжатии до 13 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,05 Вт/(м·К) и более, с максимальной температурой эксплуатации материала до +920 °С включительно, морозостойкостью не менее 100 циклов.

Предложен нетрадиционный подход обжига пористых стеклокерамических материалов, позволяющий расширить номенклатуру строительных материалов, а также снизить себестоимость строительства, ремонта и реконструкции объектов промышленного и гражданского назначения.

Методология и методы исследования

При проведении исследований использован комплексный подход решения поставленных задач, включающий применение стандартных средств измерений и методов исследований, а также современных физико-химических методов испытаний: термогравиметрии, дифференциальной термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии, рентгеновской микротомографии и др., обеспечивающих раскрытие закономерностей получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород и процессов их структурообразования. В работе использовались действующие нормативно-технические документы, применимые к данному объекту исследования.

Положения, выносимые на защиту:

- технологическое решение получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты;
- результаты выявленных процессов, происходящих в шихте при механической активации и последующем нагреве;
- результаты по выявлению закономерностей в системе состав–технология–структура–свойства пористых стеклокерамических материалов на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород и добавок отечественного производства от количественного содержания составляющих компонентов, особенностей механической активации шихты и ее термообработки;
- составы шихты для получения пористых стеклокерамических материалов;
- результаты исследований стойкости пористых стеклокерамических материалов в условиях воздействия химических и биологических агрессивных сред.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов исследований и выводов по работе обеспечена методически обоснованным комплексом стандартных методик и современных методов исследований с использованием сертифицированного и поверенного оборудования, а также положительными результатами практического внедрения.

Внедрение результатов исследования. Осуществлен выпуск опытной партии образцов пористой стеклокерамики в форме блока размерами $510 \times 200 \times 250$ мм и в форме плит $510 \times 510 \times 100$ мм с кажущейся плотностью не более 280 кг/м 3 , пределом прочности при сжатии не менее $3,5$ МПа на базе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск). В 2022–2023 гг. для этих целей было закуплено необходимое оборудование. После отработки на базе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» всех необходимых технологических режимов и корректировки составов для производства, осуществлен выпуск партии образцов на базе ООО «Ост Клинкер» (Республика Мордовия, Ельниковский район, с. Ельники) с использованием промышленной камерной газовой печи для сушки и обжига керамических изделий «ТГРВ-400.460.235/1100Г» по технологии, описанной в патенте на изобретение № 2836963 (Способ изготовления пористой стеклокерамики / А.А. Ермаков, А.И. Родин – опубл. «24» марта 2025 г. – Бюл. № 9).

Теоретические положения и результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе и включены в программу преподавания аспирантам дисциплины «Строительные материалы и изделия» (направление подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства) в раздел: «Строительная керамика».

Апробация результатов. Основные положения диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях:

- Всероссийская с международным участием научная конференция «ЛОГАРЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ», посвященная 90-летию ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», 6–11 декабря 2021 г. (МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск);
- III Международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2022), 26–28 апреля 2022 г. (ВлГУ, г. Владимир);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Расширение применения местных сырьевых материалов и отходов предприятий Республики Мордовия, при изготовлении строительных материалов и изделий», 18–19 ноября 2022 г. (МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск);
- Двадцать первая международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», посвященная 60-летию Института архитектуры и строительства Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, 28 декабря 2022 г. (МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск);
- IV международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2023), 27–28 апреля 2023 г. (ВлГУ, г. Владимир);
- XVIII Международная научно-техническая конференция молодых учёных «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов», посвященная памяти профессора В.И. Калашникова, 25–27 октября 2023 г. (ПГУАС, г. Пенза);

– Двадцать вторая международная научно-техническая конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», посвященная 105-летию со дня рождения В.А. Карташова, 5–6 марта 2024 г. (МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск).

Публикации. В ходе проведения исследований по тематике диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 10 научных работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 6 научных работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Scopus, WoS.

Техническая новизна решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2836963 (24.03.2025).

Конкурсы. В 2022 г. автор диссертационной работы с разработкой «Разработка пористых стеклокерамических материалов на основе кремнеземсодержащих пород посредством модифицирования шихты алюмосиликатными составляющими» стал победителем программы «УМНИК» Фонда содействия инновациям (г. Саранск). 26–28 апреля 2022 в рамках конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» разработка «Пористая стеклокерамика из кремнистых пород с высокой температурой эксплуатации» объявлена победителем в номинации «Лучший инновационный проект (разработка) в следующей области: – Новые материалы и технологии, химические продукты, эффективная добыча и глубокая переработка полезных ископаемых, углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора. Вклад автора состоит в выборе направления исследования, его обосновании, в формировании цели и задач исследований, в планировании и проведении экспериментов, разработке технологии и составов для получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород; в анализе и обосновании полученных результатов исследований, изложенных в диссертационной работе, участии в пробации и внедрении результата работы.

Состав и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 159 наименований, трех приложений. Изложена на 214 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 18 таблиц. Приложения изложены на 15 страницах.

Содержание диссертации соответствует Паспорту научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки), в частности пунктам «1. Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых», «3. Разработка научно обоснованных способов управления структурообразованием строительных материалов, основанных на регулировании процессов, вынужденно возникающих при совмещении отдельных компонентов, и самопроизвольно протекающих процессов самоорганизации, в том числе

методами компьютерного проектирования», «5. Разработка и внедрение способов активации компонентов строительных смесей путем использования физических, химических, механических и биологических методов, способствующих получению строительных материалов с улучшенными показателями структуры и свойств», «6. Научное обоснование и разработка высокопрочных, экологически безопасных, биопозитивных, энергоэффективных, природоподобных строительных материалов, обеспечивающих строительство зданий и сооружений различного назначения, в том числе быстровозводимых и легко трансформируемых» и «9. Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений».

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность доктору технических наук, профессору, академику РААСН Ерофееву В.Т. за ценные советы и рекомендации при подготовке диссертационной работы; кандидату физико-математических наук, доценту Кяшкину В.М. за научные консультации по отдельным разделам диссертационной работы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи исследований, показана их научная и практическая значимость.

В первой главе проанализированы современные тенденции в области разработки строительных материалов на основе пеностекла, опыт повышения их конкурентоспособности. Показано, что из-за ряда экономических и политических проблем промышленность Российской Федерации по производство качественного блочного пеностекла пока отстает от мировых лидеров. Фактическим монополистом производства пеностекла в мире является американская фирма «Owens Corning». По своим уникальным эксплуатационным характеристикам пеностекло превосходит другие изоляционные материалы, из-за чего в настоящее время данному материалу уделяется особое внимание как за рубежом, так и в нашей стране.

Показано, что наиболее целесообразным с точки зрения энергозатрат на производство пеностекла является порошковый метод. Рассмотрены технологические схемы производства пеностекла порошковым методом, выделены их основные преимущества и недостатки.

В настоящее время основным сырьем для получения качественного пеностекла являются отходы стекольного производства, имеющие неоднородный химический состав и требующие специальной подготовки (разделение, дробление, очистка), или гранулят из специально сваренного стекла, подготовка которого еще более дорогостоящий и энергозатратный процесс.

Особое внимание уделяется получению пористой стеклокерамики (ПСК) из цеолитсодержащих (ЦСП) и кремнистых пород осадочного происхождения (диатомит, трепел, опока), крупнейшей сырьевой базой которых является

Российская Федерация. Чаще всего такие породы активируют водными растворами NaOH высокой концентрации, гранулируют, а затем обжигают.

Высокая себестоимость из-за энергозатратности производства пеностекла – основная причина, по которой пеностекло не может конкурировать с традиционными изоляционными материалами.

На основании проведенного анализа определено направление исследований и перспективность применения более дешевого в производстве сырья (цеолитсодержащих и кремнистых пород), снижения стоимости процесса производства, времени изготовления, улучшения физико-механических, теплофизических и других эксплуатационных свойств, расширяющих область применения конечной продукции.

Во второй главе приведены цель и задачи исследований, основные характеристики используемых материалов и методы исследования.

Для разработки технологии и получения образцов пористой стеклокерамики были использованы ЦСП и кремнистые породы пяти месторождений Республики Мордовия: три вида цеолитсодержащих пород (Енгалычевское проявление), один вид диатомита (Атемарское месторождение) и один вид опоки (Кулясовское месторождение) влажностью $\leq 1\%$, плавни и корректирующие добавки. В качестве плавней использовали соду кальцинированную техническую (Na_2CO_3) и термонатрит ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Массовая доля основного вещества плавней $\geq 99\%$. В качестве корректирующих добавок использовали оксид алюминия (Al_2O_3), гидроксид магния ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), карбонат магния (MgCO_3), хлориды и их кристаллогидраты (NaCl , KCl , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2). Массовая доля основного вещества добавок $\geq 97\%$. В качестве горных пород – модификаторов шихты, были использованы бокситы двух месторождений, мел, каолин и бентониты двух видов.

Известно, что ЦСП и кремнистые породы могут иметь различный химический и минералогический состав в масштабах одного месторождения, что оказывает непосредственное влияние на структуру и свойства получаемого стеклокерамического материала.

Химический и минералогический состав используемых в работе горных пород приведены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Таблица 1 – Химический состав пород

| Порода | Химический состав, % масс. | | | | | | | |
|------------|----------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------|----------------|-----------------------|
| | SiO_2 | CaO | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | K_2O | MgO | TiO_2 | Na_2O |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| ЦСП 1 | 70,94 | 2,38 | 12,38 | 3,52 | 1,71 | 1,66 | 0,50 | 0,14 |
| ЦСП 2 | 67,86 | 7,74 | 7,61 | 1,99 | 1,56 | 1,07 | 0,34 | 0,17 |
| ЦСП 3 | 62,35 | 11,27 | 6,67 | 2,05 | 1,38 | 0,94 | 0,29 | 0,09 |
| Диатомит | 81,47 | 1,51 | 5,34 | 2,05 | 0,97 | 0,89 | 0,25 | 0,20 |
| Опока | 89,7 | 0,5 | 3,8 | 1,1 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |
| Каолин | 44,3 | 0,6 | 39,26 | 0,55 | 0,53 | 0,32 | 0,51 | 0,09 |
| Бентонит 1 | 54,94 | 1,74 | 20,57 | 5,63 | 1,0 | 3,49 | 0,59 | 1,53 |
| Бентонит 2 | 57,4 | 0,6 | 20,4 | 6,3 | 1,1 | 2,4 | 0,7 | 2,5 |
| Боксит 1 | 2,88 | 0,24 | 37,56 | 35,51 | 0,01 | 0,08 | 3,37 | 0 |
| Боксит 2 | 4,44 | 0,19 | 50,21 | 14,12 | 0,02 | 0,22 | 2,66 | 0,09 |
| Мел | 5,7 | 52,0 | 1,3 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |

Окончание таблицы 1

| Химический состав, % масс. | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|------------------|------|--------------------------------|------|------|------|-------------------------------|-------|
| SO ₃ | P ₂ O ₅ | ZrO ₂ | MnO | Cr ₂ O ₃ | NiO | SrO | BaO | V ₂ O ₅ | ППП |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 0,02 | 0,26 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0 | 0,01 | 6,37 |
| 0,06 | 0,15 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 11,32 |
| 0,03 | 0,18 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 14,64 |
| 1,77 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 5,45 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,3 |
| 0,08 | 0,04 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 13,7 |
| 0,13 | 0,18 | 0,03 | 0,19 | 0 | 0 | 0,04 | 0 | 0 | 9,94 |
| 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 0 | 8,3 |
| 0,13 | 0,94 | 0,07 | 0,02 | 0,05 | 0 | 0,18 | 0 | 0,11 | 18,85 |
| 0,21 | 0,06 | 0,12 | 0,02 | 0,04 | 0 | 0,01 | 0 | 0,08 | 27,51 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39,6 |

Таблица 2 – Минералогический состав пород

| Порода | Минералогический состав, % | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|---------|-----------|----------|------|----------|--------------------------|---------|---------|-------|--------|------------------|
| | Кварц | Кальцит | Гейландит | Мусковит | ОКТ | Каолинит | Смеклит/гидр ослюдита | Гиббсит | Гематит | Гетит | Анатаз | Аморфная фаза |
| ЦСП 1 | 29,1 | 0 | 18,6 | 1,7 | 7,2 | 0 | 43,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ЦСП 2 | 15,5 | 10,5 | 20,4 | 1,7 | 23,9 | 0 | 28,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ЦСП 3 | 8,5 | 21,3 | 19,6 | 1,3 | 20,3 | 0 | 29,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Диатомит | 10,9 | 0 | 0 | 1,1 | 0 | 0 | 14,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 74,0 |
| Опока | 5,9 | 0 | 0 | 0,6 | 78,1 | 0 | 15,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Каолин | 0 | 0 | 0 | 4,5 | 0 | 95,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Бентонит 1 | 18,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,4 | 78,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Бентонит 2 | 23,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Боксит 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,0 | 0 | 53,5 | 34,0 | 2,2 | 3,3 | 0 |
| Боксит 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,1 | 0 | 74,5 | 4,5 | 10,5 | 2,4 | 0 |
| Мел | 5,6 | 94,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Предлагаемая технология получения пористых стеклокерамических материалов за один нагрев шихты базирующаяся на совместном помоле ЦСП или кремнистых пород с кальцинированной содой и корректирующими добавками с последующим обжигом до температуры не более +850 °C.

Схематично технология получения образцов ПСК представлена на рисунке 1.

Компоненты шихты совместно размалывали в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 (Германия) при перегрузках внутри стаканов от 10G до 20G, а также в вибрационной мельнице с частотой оборотов 1500 об/мин и амплитудой колебания 20 мм.

Образцы пористой стеклокерамики получали обжигом шихты в металлических формах в муфельной печи. Формы предварительно обрабатывали каолиновой обмазкой. После остывания формы с полученным материалом вместе с печью до +40 °C, она разбиралась, а образцы извлекались для дальнейших испытаний.

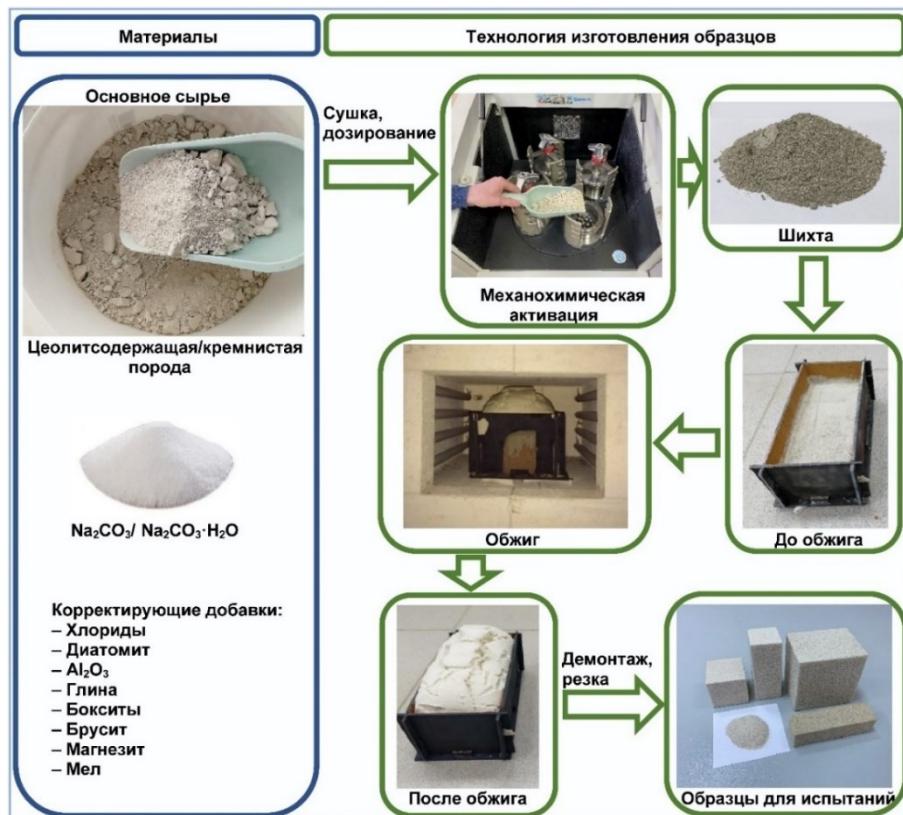


Рисунок 1 – Технология получения образцов ПСК

Физико-механические свойства шихты и образцов ПСК определяли в соответствии с ГОСТ 30744–2001 (удельная поверхность), ГОСТ EN 1602–2011 (кажущаяся плотность), ГОСТ Р 58527–2019 (предел прочности при изгибе), ГОСТ EN 826–2011 (предел прочности при сжатии). Теплофизические свойства материалов определяли в соответствии с ГОСТ 30256–94 (коэффициент теплопроводности), ГОСТ 25535–2013 (термическая стойкость), ГОСТ 5402.2–2000 (предельная температура эксплуатации). Образцы шихты и готовые стеклокерамические материалы были исследованы также с использованием физико-химических методов: рентгенофазового анализа (РФА), термического анализа (ТА), ИК-спектроскопии (ИК), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) микрокомпьютерной томографии (Микро-КТ) и др. Грибостойкость и фунгицидность образцов ПСК определяли по ГОСТ 9.049–91. Морозостойкость определяли в соответствии с ГОСТ 31359–2007 и ГОСТ 25485–2019. Химическую стойкость определяли в соответствии с ГОСТ 10134.1–2017, ГОСТ 10134.2–2017 и ГОСТ 10134.3–2017. Коэффициент звукопоглощения определяли импедансным методом по ГОСТ 16297–80. Математическую обработку и анализ результатов эксперимента проводили с использованием ЭВМ и программных комплексов.

В третьей главе представлено научное обоснование технологического решения получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты.

Согласно проведенным теоретическим исследованиям в данном направлении, выделено четыре основных условия для получения пористой стеклокерамики из

ЦСП и кремнистых пород за один нагрев шихты: 1) низкотемпературный синтез аморфной фазы; 2) наличие в составе шихты компонентов, не вступающих в реакцию при низкотемпературном синтезе аморфной фазы, которые диссоциируют с выделение воды или углекислого газа при температурах выше температуры размягчения шихты; 3) способность аморфной фазы, образовавшейся после низкотемпературного синтеза, к уменьшению вязкости до $\leq 10^7$ Па·с при последующем нагреве; 4) повышенная склонность образовавшейся аморфной фазы к кристаллизации.

Для выполнения всех вышеперечисленных условий с целью получения пористой стеклокерамики из ЦСП и кремнистых пород за один нагрев шихты необходимо лишь определить количественное содержание компонентов в ней и произвести необходимую механоактивацию.

Механическая активация ЦСП совместно с Na_2CO_3 или ее кристаллогидратами существенно влияет на изменение удельной поверхности, форму и размер частиц шихты, а также ее фазовый состав. Удельная поверхность шихты при механической активации сначала увеличивается, а затем уменьшается. Образуются агрегаты сферической формы. Размер агрегатов увеличивается от времени активации (рисунок 2).

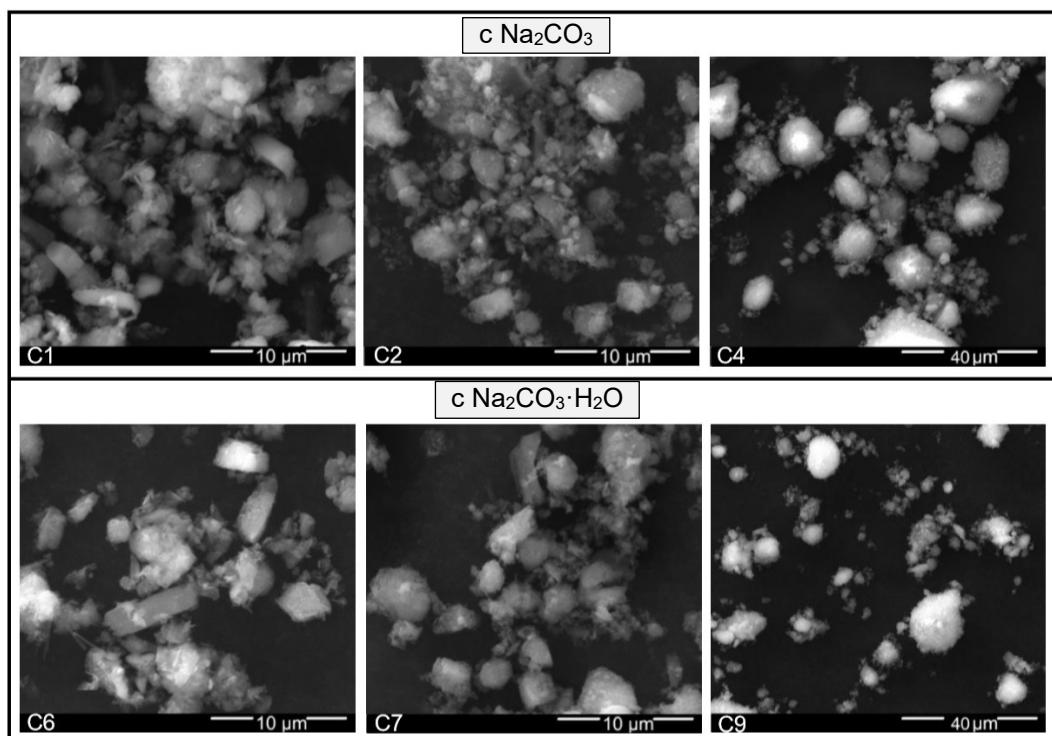


Рисунок 2 – Микроструктурные изменения образцов шихты:
C1, C6 – 10 минут помола (10G); C2, C7 – 30 минут помола (10G);
C4, C9 – 90 минут помола (10G)

Разработана методика для контроля помола шихты, позволяющая получать образцы пористой стеклокерамики с заданными свойствами. Контролировать продолжительность механоактивации шихты возможно несколькими методами:

газопроницаемости, рентгеновской дифракции, термическим и разработанным методом ускоренного вспенивания.

Установлены процессы, происходящие в шихте при нагревании после ее механоактивации. Силикатообразование в шихте начинается при температуре $\approx +400$ °C, потеря массы образца практически полностью прекращается при $+670$ °C. Спекание образцов шихты без кальцита в составе завершается при температуре обжига до $\approx +680$ °C, а с кальцитом и добавками до $\approx +660$ °C. С увеличением температуры обжига шихты до спекания увеличивается количество аморфной фазы в образце. Дальнейшее увеличение температуры обжига приводит к размягчению аморфной фазы и вспениванию шихты. Вспенивающим компонентом является водяной пар, конденсируемый из гидроксильных групп в большей степени гидрослюд и глинистых минералов смектитовой группы. Образцы шихты без кальцита и корректирующих добавок в составе вспениваются медленно в интервале температур от $+680$ °C до $+820$ °C. Вспенивание образцов шихты с кальцитом начинается при температуре $\approx +660$ °C. Процесс протекает интенсивно и завершается при температуре $\approx +760$ °C. Используемые в работе добавки в составе шихты ($Mg(OH)_2 \leq 3\%$, $MgCO_3 \leq 4,4\%$, $Al_2O_3 \leq 3\%$) не оказывают существенного влияния на процессы вспенивания при ее нагревании.

Химический и минералогический состав ЦСП, а также добавки ($Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ и Al_2O_3) в составе шихты оказывают существенное влияние на температурные интервалы кристаллизации и фазовый состав образцов пористой стеклокерамики (рисунок 3).

Из шихты на основе ЦСП и кальцинированной соды без кальцита и добавок получена анортоклазовая пористая стеклокерамика, из пород с кальцитом – волластонитовая и волластонито-комбейтовая стеклокерамики. При введении в состав шихты магнийсодержащих добавок кристаллизуется диопсидовая стеклокерамика. Процесс кристаллизации диопсидовой пористой стеклокерамики завершается при температуре $\approx +790$ °C, что на 50 °C меньше, чем для анортоклазовой стеклокерамики.

В четвертой главе установлено влияние химического и минералогического состава ЦСП и кремнистых пород, а также различных добавок на структуру, физико-механические, теплофизические и другие эксплуатационные свойства образцов пористой стеклокерамики.

Для получения пористых стеклокерамических материалов с равномерной мелкопористой структурой из ЦСП и кремнистых пород с повышенным содержанием кальцита необходимо в качестве добавки использовать хлориды ($NaCl$, KCl , $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2$). Небольшое количество хлорида в составе шихты существенно влияет на структуру и свойства вспененного материала (рисунок 4).

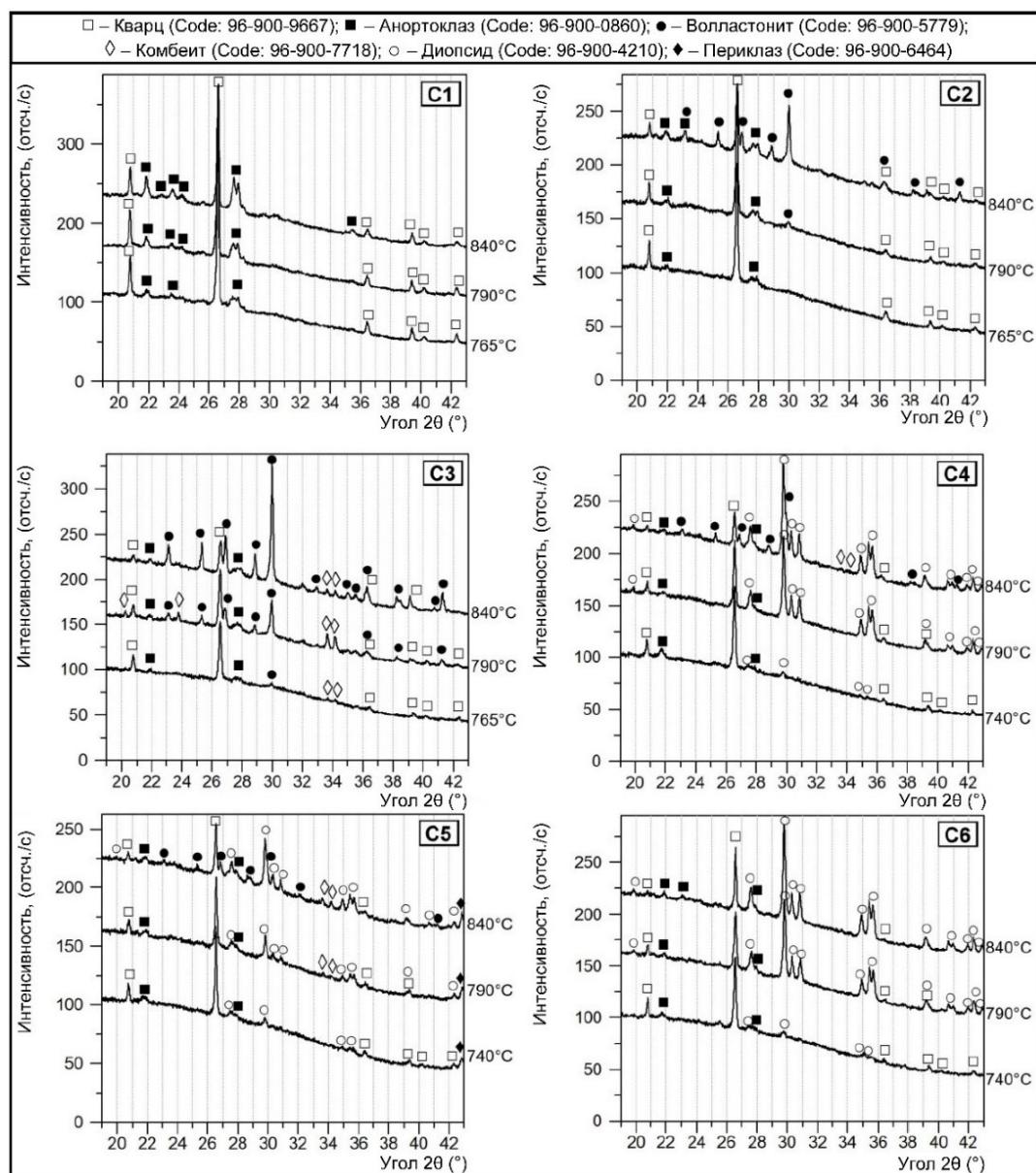


Рисунок 3 – РФА образцов шихты разного состава после обжига:
 С1 – 81,5 % ЦСП 1 + 18,5 % Na_2CO_3 ; С2 – 81,5 % ЦСП 2 + 18,5 % Na_2CO_3 ;
 С3 – 81,5 % ЦСП 3 + 18,5 % Na_2CO_3 ;
 С4 – 63,5 % ЦСП 3 + 15 % диатомита + 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 18,5 % Na_2CO_3 ;
 С5 – 62,1 % ЦСП 3 + 15 % диатомита + 4,4 % MgCO_3 + 18,5 % Na_2CO_3 ;
 С6 – 60,5 % ЦСП 3 + 15 % диатомита + 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 3 % Al_2O_3 + 18,5 % Na_2CO_3

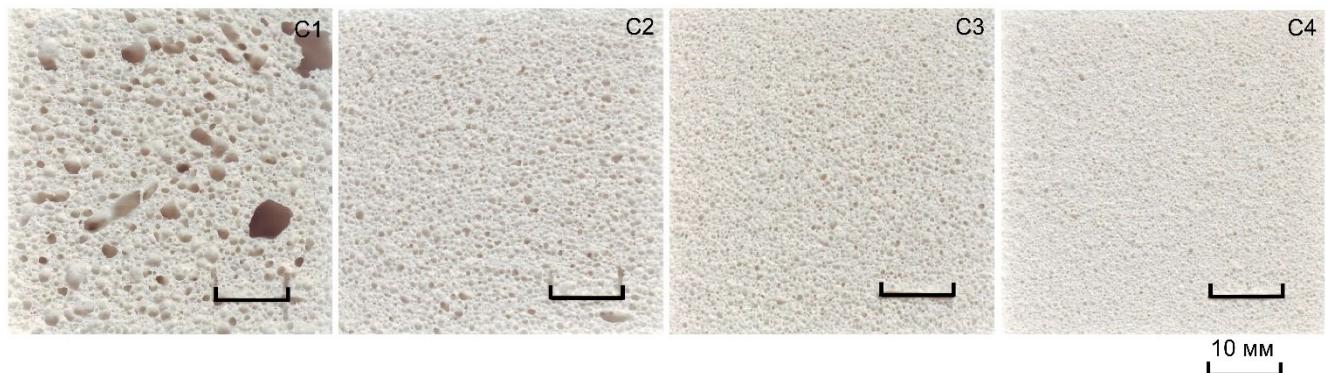


Рисунок 4 – Влияние хлоридов на макроструктуру образцов ПСК:
 С1 – состав без хлоридов; С2 – 0,092 % NaCl ; С3 – 0,184 % NaCl ; С4 – 0,368 % NaCl

При увеличении в шихте количества добавки хлорида до 0,368 % ускорился процесс силикатообразования и снизилась температура декарбонизации кальцита (рисунок 5).

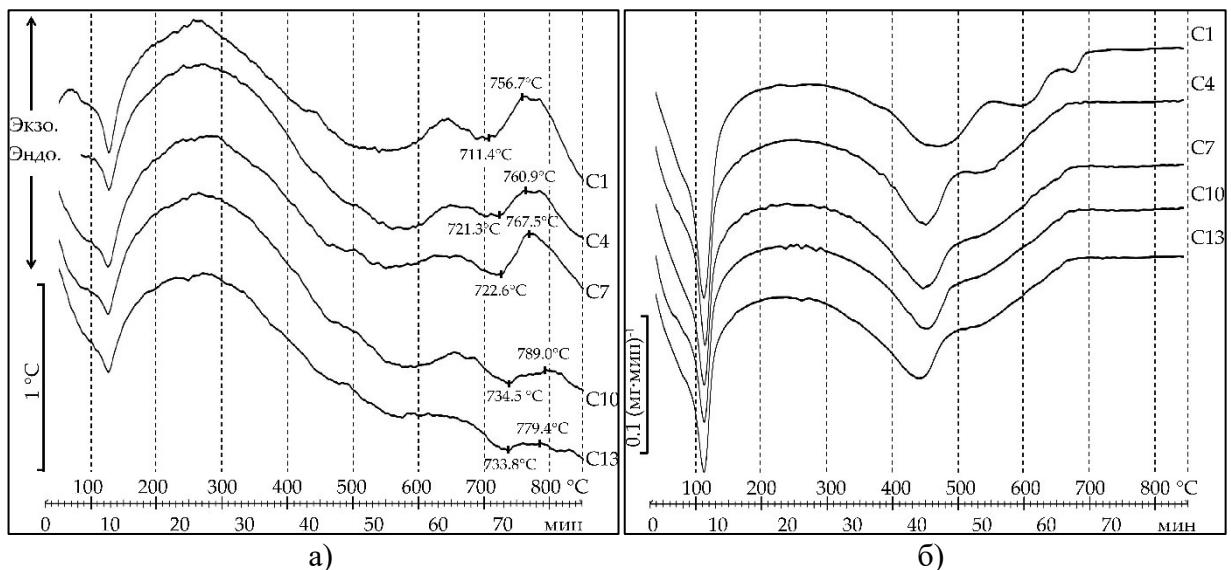


Рисунок 5 – ДТА (а) и ДТГ (б) кривые образцов шихты с хлоридами:
C1 – состав без хлоридов; C4 – 0,368 % NaCl; C7 – 0,368 % KCl;
C10 – 0,368 % $MgCl_2 \cdot 6H_2O$; C13 – 0,368 % $CaCl_2$

Установлены количественные зависимости изменения свойств образцов ПСК от вида и количества хлоридов в составе шихты. В среднем 89–90 % объема полученного материала занимают мелкие поры. Кажущаяся плотность образцов находится в пределах 245–267 кг/м³. Предел прочности при изгибе и при сжатии достигает соответственно 1,75 МПа и 3,8 МПа. Минимальный коэффициент теплопроводности модифицированных образцов 0,065 Вт/(м·К). Предельная температура эксплуатации материала +860 °C, а минимальная термическая стойкость +170 °C.

Определено влияние количества кальцита и оксида алюминия в составе шихты на ее фазовый состав после механоактивации, фазовые превращения в шихте при нагревании, фазовый состав и микроструктуру обожженной пористой стеклокерамики. Основной кристаллической фазой стеклокерамики из шихты без кальцита является анортоклаз и кварц. Образцы из шихты с кальцитом дополнительно содержат волластонит и девитрит. С увеличением в составе шихты количества Al_2O_3 в стеклокерамике образуется нефелин. С увеличением $CaCO_3$ изменяется пористость образцов, размер и форма пор. Внутри материала образуются каналы, которые состоят из соединенных соседних пор. В стенках пор появляются микроскопические отверстия. С увеличением количества $CaCO_3$ в составе шихты открытая пористость образцов пористой стеклокерамики увеличивается с 5 % до >54 % (рисунок 6).

Разработанная пористая стеклокерамика имеет кажущуюся плотность 239–344 кг/м³, предел прочности при изгибе и при сжатии до 2,1 МПа и 5,1 МПа соответственно, коэффициент теплопроводности 0,065–0,09 Вт/(м·К), термическую стойкость до +230 °C.

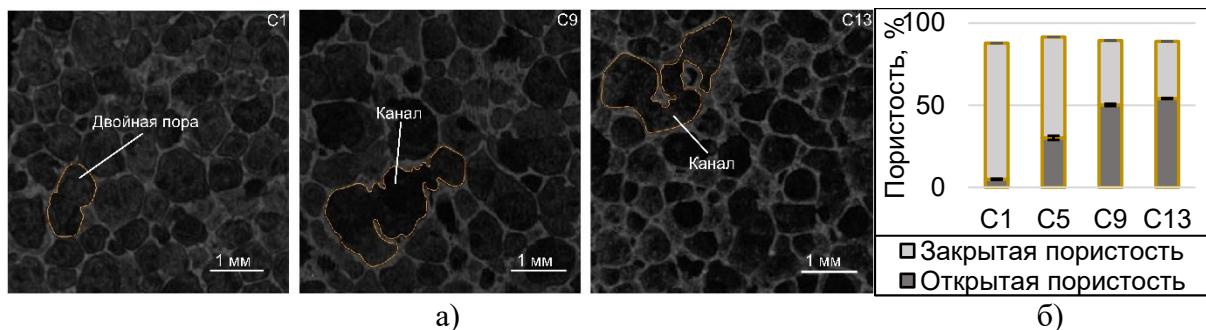


Рисунок 6 – МикроКТ (а) и пористость (б) образцов пористой стеклокерамики из шихты с разным количеством CaCO_3 в составе:

C1 – из ЦСП 1 с 0 % CaCO_3 ; C5 – из ЦСП 1 и ЦСП 2 в соотношении 2:1;
C9 – из ЦСП 1 и ЦСП 2 в соотношении 1:2; C13 – из ЦСП 2 с 10,5 % CaCO_3

Предельная рабочая температура образцов была увеличена до +920 °С в результате введения в шихту чистого Al_2O_3 , каолина и бокситов. Установлено, что количество добавки зависит от количества кальцита в кремнистой породе. С увеличением количества CaCO_3 необходимо увеличивать содержание Al_2O_3 в составе шихты.

Установлено влияние $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и совместно с ним Al_2O_3 в составе шихты из ЦСП, кремнистых пород и соды кальцинированной на структуру, фазовые превращения в шихте при нагревании и фазовый состав обожженной пористой стеклокерамики. Из шихты с добавкой $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в стеклокерамике вместо волластонита образуется диопсид, а вместо девитрита – комбеит. Для получения равномерной мелкопористой структуры стеклокерамических материалов из кремнистой породы и кальцинированной соды с добавкой $\text{Mg}(\text{OH})_2$ необходимо минимизировать образование в составе обожженной стеклокерамики минерала комбеита. Данная задача решена введением в состав шихты диатомита.

Установлено, что при увеличении в составе стеклокерамики минерала диопсида уменьшилась открытая пористость и кажущаяся плотность образцов. Кажущуюся плотность образцов изменяется от 135 кг/м³ до 235 кг/м³, а коэффициент теплопроводности соответственно от 0,05 Вт/(м·К) до 0,067 Вт/(м·К) (рисунок 7).

Разработанная пористая стеклокерамика имеет предел прочности при изгибе и при сжатии до 1,6 МПа и 4,2 МПа соответственно, термическую стойкость +170 °С, предельную температуру эксплуатации до +870 °С. На предельную температуру эксплуатации разработанных стеклокерамических материалов оказывает существенное влияние количество минерала комбеита в их составе. С его увеличением предельная температура эксплуатации образцов уменьшилась.

Подтверждена возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания.

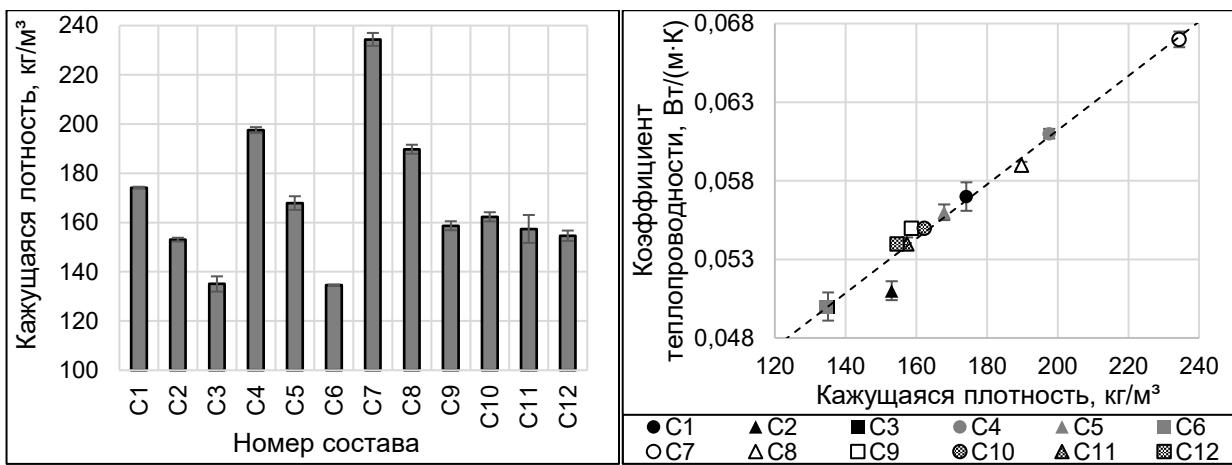


Рисунок 7 – Влияние добавки $\text{Mg}(\text{OH})_2$ на кажущуюся плотность (а) и коэффициент теплопроводности (б) образцов ПСК:

C1, C2, C3 – 0, 1,5, 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 5 % диатомита;

C4, C5, C6 – 0, 1,5, 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 10 % диатомита;

C7, C8, C9 – 0, 1,5, 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 15 % диатомита;

C10, C11, C12 – 1, 2, 3 % Al_2O_3 + 3 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 15 % диатомита

Установлено влияние вида и количества корректирующих добавок (мел, глина) на температурные интервалы спекания и вспенивания шихты и фазовые превращения в ней при нагревании (рисунок 8). При увеличении в составе шихты количества мела до 15 % процесс спекания образцов заканчивается при температуре $+640^\circ\text{C}$, а при температуре $+700^\circ\text{C}$ завершается их интенсивное вспенивание. Основное влияние глины (до 22,5 %) в составе шихты совместно с мелом при ее нагревании связано со смещением процесса спекания и начала вспенивания образцов в сторону больших температур.

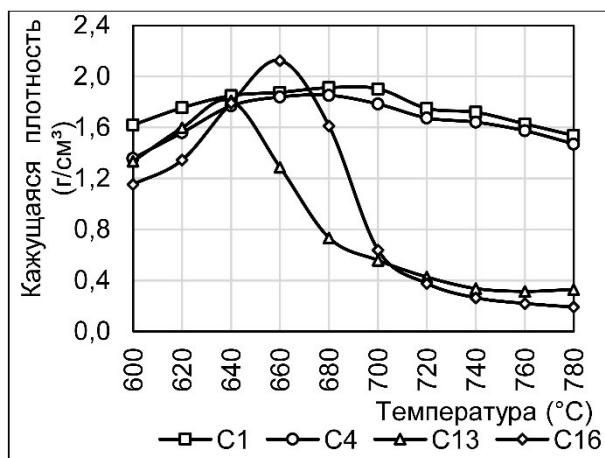


Рисунок 8 – Изменение кажущейся плотности образцов в зависимости от температуры обжига:
C1 – без добавок; C4 – 22,5 % бентонита 2;
C13 – 15 % мела; C16 – 15 % мела + 22,5 % бентонита 2

В результате на основе опок получены образцы пористой стеклокерамики с мелкопористой структурой в форме блоков размером $500\times500\times200$ мм с

кажущейся плотностью от 190 кг/м³, пределом прочности при сжатии более 2 МПа и с коэффициентом теплопроводности от 0,06 Вт/(м·К).

В результате использования различных ЦСП, кремнистых пород и добавок (хлориды, алюмосиликаты, кальцийсодержащие, магнийсодержащие и другие) в составе шихты получены стеклокерамические материалы со следующими характеристиками: открытой пористостью от 3 до 70 %, кажущейся плотностью 135–410 кг/м³ и более, пределом прочности при сжатии до 13 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,05 Вт/(м·К) и более, предельной температурой эксплуатации материала до +920 °С включительно, термической стойкостью до +230 °С.

Прочностные характеристики ПСК увеличиваются при увеличении в составе материала минерала волластонита. Термическая стойкость в большей степени зависит от структуры материала (закрытая или открытая пористость). Чем выше закрытая пористость, тем ниже термическая стойкость и наоборот. Предельная температура эксплуатации увеличивается с увеличением в составе шихты Al₂O₃ и уменьшается при преобладании в составе минерала девитрита. Содержание MgO в составе шихты способствует уменьшению кажущейся плотности образцов.

В пятой главе получены качественные и количественные зависимости химической и биологической стойкости, а также звукопоглощающих свойств образцов ПСК от их химического и минералогического состава и структуры.

Установлена высокая стойкость образцов ПСК в воде, водном растворе HCl и щелочах. Химическую стойкость образцов пористой стеклокерамики в водном растворе HCl можно увеличить, уменьшив количество волластонита, девитрита и нефелина в составе материала. Также отмечено уменьшение стойкости образцов ПСК в растворах щелочей с увеличением в составе материала минерала девитрита.

Стойкость разработанных образцов ПСК к воздействию плесневых грибов можно также увеличить, изменив фазовый состав материала. Все исследованные образцы обладают грибостойкими свойствами. В отсутствии внешних загрязнений только диопсидовая стеклокерамика содержит питательные вещества, которые способствуют незначительному развитию плесневых грибов. При наличие питательной среды, независимо от фазового состава всех образцов, фунгицидный эффект отсутствует (оптимальные условия для жизнедеятельности микромицетов) (рисунок 9).

Доминирующим видом микромицетов на поверхности всех образцов ПСК после 14 суток испытания в стандартной среде мицелиальных грибов по ГОСТ 9.049–91 (метод 3) является *Penicillium cyclopium*. В зависимости от фазового состава образцов на их поверхности присутствуют отдельными небольшими колониями грибы видов *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium funiculosum* и *Aspergillus niger*, которые в разной степени токсичны для человека и животных.

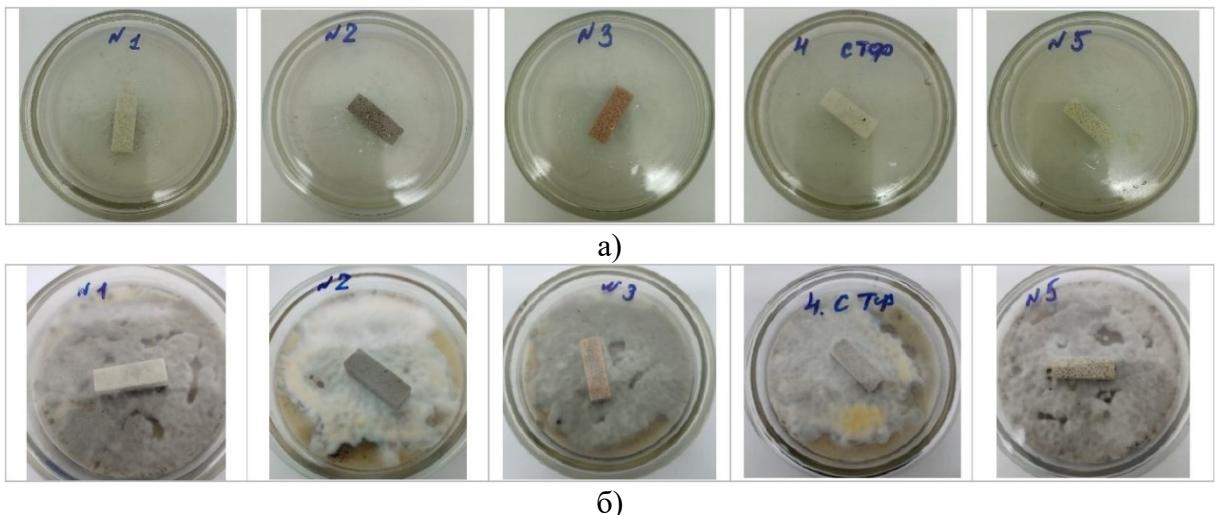


Рисунок 9 – Фото образцов после испытания:

а – по методу 1 (без питательной среды); б – по методу 3 (с питательной средой)

Установлено влияние вида и характера пор образцов ПСК из ЦСП и кремнистых пород на их звукопоглощающие свойства. Звукопоглощающие свойства образцов ПСК находятся в прямой зависимости от количества открытых пор в материале. С увеличением данного показателя с 4,5 % до 18,3 % коэффициент звукопоглощения материала увеличивается в 1,5–2 раза (в зависимости от частоты звуковой волны). Размер и форма пор образцов также оказывает влияние на коэффициент звукопоглощения. Разработанные материалы, при обеспечении высокого показателя открытой пористости, могут быть использованы в качестве звукопоглощающих материалов.

Шестая глава посвящена внедрению разработанных составов и технологии получения в промышленность строительных материалов.

Осуществлен выпуск опытной партии образцов пористой стеклокерамики в форме блока размерами $510 \times 200 \times 250$ мм и в форме плит $510 \times 510 \times 100$ мм с кажущейся плотностью не более $280 \text{ кг}/\text{м}^3$, пределом прочности при сжатии не менее 3,5 МПа на базе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск). В 2022–2023 гг. для этих целей было закуплено необходимое оборудование.

После отработки на базе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» всех необходимых технологических режимов и корректировки составов для производства осуществлен выпуск партии образцов на базе ООО «Ост Клинкер» (Республика Мордовия, Ельниковский район, с. Ельники) с использованием промышленной камерной газовой печи для сушки и обжига керамических изделий «ТГРВ-400.460.235/1100Г» по технологии, описанной в патенте на изобретение № 2836963 (Способ изготовления пористой стеклокерамики / А.А. Ермаков, А.И. Родин – опубл. «24» марта 2025 г. – Бюл. № 9).

Полученные в промышленной печи образцы пористой стеклокерамики распиливали ленточной пилой с полотном по металлу М42 $2910 \times 27 \times 0,90$ мм на мелкоштучные блоки. Результаты испытания полученной партии образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства образцов пористой стеклокерамики, полученных в промышленной камерной газовой печи

| Наименование показателя | Нормативный источник | Значение |
|---|----------------------|--------------|
| Кажущаяся плотность, кг/м ³ | ГОСТ EN 1602–2011 | 275 |
| Предел прочности при сжатии, МПа | ГОСТ EN 826–2011 | 4,5 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C) | ГОСТ 30256–94 | 0,073 |
| Максимальная температура применения, °C | ГОСТ 5402.2–2000 | +860 |
| Пористость (открытая/закрытая), % | – | 89 (32/57) |
| Морозостойкость, циклы | ГОСТ 25485–2019 | не менее 100 |

По многим показателям разработанная пористая стеклокерамика превосходит известные аналоги. По показателю предела прочности при сжатии пористая стеклокерамика не менее чем в 2,5 раза превосходит бетоны ячеистые автоклавного и неавтоклавного твердения, при одинаковой плотности, а также более чем в 2 раза превосходит по показателю морозостойкости. По показателю максимальной температуры применения почти в 2 раза превосходит пеностекло.

По результатам проведенных полупромышленных испытаний разработанной технологии получения пористой стеклокерамики составлена калькуляция затрат на производство 1 м³ готового продукта, себестоимость которого составила 12320 руб., что более чем в 1,5 раза меньше, чем у пеностекла, полученного по традиционной технологии.

Заключение

Итоги выполненного исследования

Решена научная проблема, заключающаяся в разработке научно-обоснованного технологического решения получения пористых стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты, отличающихся высокими физико-механическими, теплофизическими, гидрофизическими свойствами, а также относительно низкой себестоимостью производства.

1. Раскрыты качественно новые закономерности в технологическом решении получения пористых стеклокерамических материалов, обладающих высокими физико-механическими, теплофизическими, эксплуатационными свойствами и низкой себестоимостью производства, осуществляя методом совместного сверхтонкого помола цеолитсодержащих и кремнистых пород, плавня (кальцинированная сода, термонатрит) и различных добавок (хлориды, алюмосиликаты, кальцийсодержащие, магнийсодержащие и другие) с последующим одностадийным обжигом до температуры не более +850 °C.

2. Технология получения эффективных стеклокерамических материалов из цеолитсодержащих и кремнистых пород за один нагрев шихты базируется на основных четырех условиях: низкотемпературном синтезе аморфной фазы; наличия в составе шихты компонентов, не вступающих в реакцию при низкотемпературном синтезе аморфной фазы, которые диссоциируют с выделением воды или углекислого газа при температурах выше температуры размягчения шихты; способности аморфной фазы, образовавшейся после низкотемпературного синтеза, к уменьшению вязкости до $\leq 10^7$ Па·с при последующем нагреве; повышенной склонности образовавшейся аморфной фазы к кристаллизации.

3. Определены закономерности изменения основных параметров технологических процессов, происходящих в шихте от вида и продолжительности механической активации: удельной поверхности, которая при механоактивации сначала увеличивается, а затем уменьшается; образования агрегатов сферической формы с размерами, увеличивающимися от времени активации на величину более 15 мкм. Установлено, что в результате механической активации шихты важно добиться размера кристаллитов кальцита менее 50 нм.

4. Разработана новая экспериментальная методика ускоренного вспенивания, позволяющая в комплексе с базовыми методами газопроницаемости, рентгеновской дифракции, термического анализа, используемых для контроля помола шихты, повысить точность измерений и расширить границы применимости полученных результатов.

5. С помощью современных методов термогравиметрии, дифференциальной термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии, микротомографии, световой, а также сканирующей электронной микроскопии, использованных при изучении фазовых превращений, происходящих в шихте при нагревании на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород, модифицированной добавками отечественного производства, доказана эффективность применения одноциклового нагрева.

6. Определены границы температурных интервалов, определяющие изменения, происходящие в шихте в процессе структурообразования: $\approx +400$ °C – силикатообразование; $\approx +680$ °C ($\approx +660$ °C с добавлением кальцита) – спекание с увеличением аморфной фазы; $\approx +680 \text{--} \approx +820$ °C и $\approx +680 \text{--} \approx +760$ °C (с добавкой кальцита) – вспенивание. Вспенивающим компонентом является водяной пар, конденсируемый из гидроксильных групп гидрослюд и глинистых минералов. Используемые в работе добавки в составе шихты ($\text{Mg(OH)}_2 \leq 3\%$, $\text{MgCO}_3 \leq 4,4\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 3\%$) не оказывают существенного влияния на процессы вспенивания при ее нагревании.

7. Разработаны составы, а также ресурсо- и энергосберегающая технология получения пористых стеклокерамических материалов. Доказано, что химический и минералогический составы цеолитсодержащих, кремнистых пород и вводимых в состав шихты добавок (Mg(OH)_2 , MgCO_3 и Al_2O_3) оказывают существенное влияние на температурные интервалы кристаллизации и фазовый состав пористой стеклокерамики. Из шихты на основе цеолитсодержащих и кремнистых пород и кальцинированной соды без кальцита и добавок получена анортоклазовая пористая стеклокерамика, из пород с кальцитом – волластонитовая и волластонито-комбейтовая стеклокерамики. При введении в состав шихты магнийсодержащих добавок кристаллизуется диопсидовая стеклокерамика. Процесс кристаллизации диопсидовой пористой стеклокерамики завершается при температуре $\approx +790$ °C, что на 50 °C меньше, чем для анортоклазовой стеклокерамики.

8. Установлены закономерности в системе состав–технология–структура–свойства для разработанных пористых стеклокерамических материалов в зависимости от содержания составляющих компонентов шихты, особенностей ее

механоактивации и термообработки, позволяющие получить строительные материалы с кажущейся плотностью 140–410 кг/м³, пределом прочности при сжатии до 13 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,05 Вт/(м·К) и более, с максимальной температурой эксплуатации материала до +920 °С включительно, морозостойкостью не менее 100 циклов.

9. Предложены оптимальные составы и даны рекомендации по составам компонентов шихты. Для получения пористых стеклокерамических материалов, шихта должна иметь следующий химический состав: SiO₂ – 50–72 %; CaO – 0–10 %; Al₂O₃ – 3–17 %; Fe₂O₃ – 0–6 %; K₂O – 0–1,8 %; MgO – 0–2,2 %; Na₂O – 6–13 %. Представленные оксиды должны находиться в составе следующих минералов: SiO₂ – в составе опал-кристаболит-тридимитовой фазы, минералов смектитовой, гидрослюдистой и цеолитовой группы или аморфной фазе; CaO – в составе кальцита; Al₂O₃ и Fe₂O₃ – в составе глинистых минералов, цеолитов и бокситов; MgO – в составе минералов магнезита, доломита, брусита; K₂O – в составе глинистых и цеолитовых минералов, а также поташа; Na₂O – в составе кальцинированной соды и ее кристаллогидратов. Для ускорения декарбонизации кальцита и других карбонатов в состав шихты целесообразно вводить корректирующие добавки в виде хлоридов натрия, калия, кальция или магния в количестве до 0,2 % от массы шихты.

10. Выявлены закономерности изменения химической и биологической стойкости разработанных пористых стеклокерамических материалов от их фазового состава, макро- и микроструктуры. Все полученные образцы пористой стеклокерамики обладают грибостойкими свойствами. На химическую стойкость образцов основное влияние оказывает их фазовый состав. Уменьшение в составе материала количества волластонита, девитрита и нефелина способствует увеличению химической стойкости.

11. Установлено влияние вида и характера пор образцов пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих и кремнистых пород на их звукопоглощающие свойства. Звукопоглощающие свойства образцов пористой стеклокерамики находятся в прямой зависимости от количества открытых пор в материале. Разработанные материалы, при обеспечении высокого показателя открытой пористости, могут быть использованы в качестве звукопоглощающих материалов.

12. Выполнено производственное внедрение разработанных пористых стеклокерамических строительных материалов с высокой максимальной температурой эксплуатации на предприятии реального сектора экономики. Осуществлен выпуск опытной партии образцов пористой стеклокерамики в форме блока размерами 510×200×250 мм и в форме плит 510×510×100 мм с кажущейся плотностью 275 кг/м³, пределом прочности при сжатии 4,5 МПа на базе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» и на базе ООО «Ост Клинкер» с использованием промышленной камерной газовой печи для сушки и обжига керамических изделий «ТГРВ-400.460.235/1100Г» по технологии, описанной в патенте на изобретение № 2836963. Себестоимость 1 м³ выпущенной опытной партии образцов составила 12320 руб. Внедрение результатов диссертационной работы в учебно-методическом процессе осуществляется при изучении аспирантами ФГБОУ ВО

«МГУ им. Н.П. Огарёва» дисциплины «Строительные материалы и изделия» (направление подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства) в разделе «Строительная керамика».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Материал получен полностью из отечественного сырья: цеолитсодержащие и кремнистые породы, карбонатные породы, глины и кальцинированная сода. Запасы сырья в Российской Федерации огромны, а их добычу можно вести самым простым открытым способом. Технология одновременно проста и уникальна и представляет собой совместный сухой помол кремнистых пород и кальцинированной соды с последующим обжигом.

Организовать производство разработанной пористой стеклокерамики возможно уже в ближайшие годы во многих регионах страны. Производства будут независимы от импортных поставок сырья и оборудования, что обеспечит кроме экономического роста и социального развития Российской Федерации, еще и ее технологический суверенитет.

Изделия из разработанной пористой стеклокерамики могут быть использованы в качестве теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного материала при строительстве и реконструкции объектов жилищно-гражданского строительства, атомной и нефтегазодобывающей промышленности, трубопроводов, различных промышленных установок (плавильных печей, котельного оборудования) и т.п. Низкая теплопроводность материала в сочетании с малым весом изделий из него позволит успешно применять его при строительстве зданий и сооружений в условиях крайнего Севера и Арктики. Благодаря низкой теплопроводности при эксплуатации зданий уменьшится потребление энергии в северных регионах, а легкость монтажа снизит стоимость и сроки строительства.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих научных изданиях:

в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Ерофеев В.Т. Исследование фазовых превращений в шихте (трепел : Na_2CO_3) для пеностеклокерамики / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.С. Кравчук, А.А. Ермаков // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3 (40). – С. 16-23 (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,5/0,1875 у.п.л.).

2. Ерофеев В.Т. Физико-механические и теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.С. Кравчук, А.А. Ермаков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 5. – С. 8-15. https://doi.org/10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374 (К1; ИФ РИНЦ – 0,616; 0,5/0,1875 у.п.л.).

3. Ерофеев В.Т. Стойкость пеностеклокерамики в водной и микробиологической средах / В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов, А.И. Родин, А.С. Кравчук, А.А. Ермаков // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 5 (1017). – С. 21-23. (К2; ИФ РИНЦ – 0,286; 0,1875/0,0625 у.п.л.).

4. Родин А.И. Влияние алюмосиликатов на свойства пористой стеклокерамики из кремнистых пород / А.И. Родин, А.А. Ермаков, П.И. Абрашин, В.Т. Ерофеев // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 3 (101). – С. 119-130. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-101-3-119-130> (К1; ИФ РИНЦ – 0,827; 0,75/0,3125 у.п.л.).

5. Родин А.И. Структура и свойства пористой стеклокерамики из шихты на основе кремнистых пород, модифицированной бокситами / А.И. Родин, А.А. Ермаков, В.Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 5-16. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_5 (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,75/0,3125 у.п.л.).

6. Rodin A.I. Porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of magnesite / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, A.S. Kravchuk // AlfaBuild. – 2023. – 1(26). – Article No. 2605. (К1; 0,75; 0,75/0,3125). <https://doi.org/10.57728/ALF.26.5> (К3; ИФ РИНЦ – 0,396; 0,5625/0,25 у.п.л.).

7. Ерофеев В.Т. Влияние химического и минералогического состава пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород на ее химическую стойкость / В.Т. Ерофеев, А.А. Ермаков, А.И. Родин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 4-13. https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_4 (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,625/0,3125 у.п.л.).

8. Родин А.И. Пористая стеклокерамика из опоки, кальцинированной соды и корректирующих добавок / А.И. Родин, А.А. Ермаков, В.М. Кяшкин, А.М. Асташов, Д.А. Буянкин // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3(113). – С. 123-134. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-113-3-123-134> (К1; ИФ РИНЦ – 0,827; 0,75/0,3125 у.п.л.).

9. Ермаков А.А. Стойкость пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород к воздействию плесневых грибов / А.А. Ермаков, А.И. Родин, Е.А. Захарова // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4 (61). – С. 73-80. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_4_73 (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,5/0,25 у.п.л.).

10. Ермаков А.А. Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород / А.А. Ермаков, А.И. Сафин, А.И. Родин // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1521-1529. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.9.1521-1529> (К1; ИФ РИНЦ – 1,150; 0,5625/0,25 у.п.л.).

в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Scopus, WoS:

11. Erofeev V.T. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, V.S. Bochkin, A.A. Ermakov // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – 100 (8). – Article Number A6. <https://doi.org/10.18720/MCE.100.6>

12. Erofeev V.T. Properties of porous glass ceramics based on siliceous rocks / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, V.S. Bochkin, A.A. Ermakov // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – 102 (2). – Article No. 10202. <https://doi.org/10.34910/MCE.102.2>

13. Rodin A. Porous glass ceramics from siliceous rocks with high operating temperature / A. Rodin, A. Ermakov, V. Kyashkin, N. Rodina, V. Erofeev // Magazine of

Civil Engineering. – 2022. – 8 (116). – Article No. 11615C.
<https://doi.org/10.34910/MCE.116.15>

14. Rodin A. Effect of chlorides content on the structure and properties of porous glass ceramics obtained from siliceous rock / A. Rodin, A. Ermakov, I. Erofeeva, V. Erofeev // Materials. – 2022. – 15. – 3268. <https://doi.org/10.3390/ma15093268>

15. Rodin A. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks / A. Rodin, A. Ermakov, V. Kyashkin, N. Rodina, V. Erofeev // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – 5 (121). – Article No. 12109. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.9>

16. Rodin A.I. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, I.V. Erofeeva, V.T. Erofeev // Materials physics and mechanics. – 2023. – 51 (5). – C. 127-141. https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_13

в других печатных изданиях:

17. Родин А.И. Теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород / А.И. Родин, А.А. Ермаков // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2020. – № 2 (11). – С. 49-55.

18. Ермаков А. А. Физико-механические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород с высоким содержанием CaCO₃ / А.А. Ермаков, А.И. Родин // Огарёв-Online. – 2021. – № 6 (159).

19. Ермаков А.А. Пористые стеклокерамические материалы на основе кремнеземсодержащих пород Республики Мордовия / А.А. Ермаков, П.И. Абрашин, А.И. Родин // L Огарёвские чтения: Материалы всероссийской с международным участием научной конференции. В 3-х частях, Саранск, 06–11 ноября 2021 года. Часть 1. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2022. – С. 613-618.

20. Ермаков А.А. Анализ месторождений опок Республики Мордовия и их пригодность для получения пористой стеклокерамики / А.А. Ермаков, Д.А. Буянкин, В.М. Родин, В.С. Веселова // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Материалы двадцать второй Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения В.А. Карташова, Саранск, 05–06 марта 2024 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2024. – С. 64-68.

в объектах интеллектуальной собственности:

21. Патент № 2836963 Российской Федерации, МПК C04B 38/08, C04B 35/14 (2006.01). Способ изготовления пористой стеклокерамики : № 2024115131 : заявл. 03.06.2024 : опубл. 24.03.2025 / А.А. Ермаков, А.И. Родин; заявитель Ермаков Анатолий Анатольевич. – 6 с.

Ермаков Анатолий Анатольевич

**ПОРИСТЫЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ И КРЕМНИСТЫХ ПОРОД**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.12.2025. Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ № 668.

Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24