

На правах рукописи

Максимова Регина Игоревна



**СИНТЕЗ ГИДРОКАРБОАЛЮМИНАТОВ КАЛЬЦИЯ И
РЕЦИКЛИНГ ИЗВЕСТКОВОГО КОМПОНЕНТА ПРИ
КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФЕЛИНОВОГО
СЫРЬЯ**

*Специальность 2.6.2. Metallургия черных,
цветных и редких металлов*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бричкин Вячеслав Николаевич

Официальные оппоненты:

Шепелев Игорь Иннокентьевич

доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Экологический инжиниринговый центр», директор;

Немчинова Нина Владимировна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра металлургии цветных металлов, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **30 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.5 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НИКОЛАЕВА
Надежда Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Использование альтернативных сырьевых ресурсов для производства алюминия хорошо известно и начало их применения может быть отнесено к самым ранним этапам его промышленного получения из алунитов, квасцов, криолита и глинистых пород различного минерального состава. Технологический прорыв в использовании щелочных алюмосиликатов, как противовес массовому применению бокситов для получения глинозема, можно отнести к 30-ым и 40-ым годам XX века в связи с промышленным освоением отечественных запасов апатит-нефелиновых руд и поиском решений для переработки нефелиновой составляющей в составе хвостов апатитовой флотации. Это определило технологический суверенитет России в области комплексного использования высококремнистого алюминиевого сырья, позволило создать развитую научную базу производства глинозема и обозначить проблемные вопросы, существенное влияние которых на освоение данного сырьевого источника сохраняется до настоящего времени.

Ключевые направления дальнейшего повышения эффективности переработки алюмосиликатного сырья неизменно связаны со снижением энергоемкости технологического процесса, повышением качества основной и попутной продукции, уменьшением углеродного следа и количества складированных твердых отходов. В полной мере эти проблемные вопросы являются определяющими для производства глинозема из нефелиновых сиенитов и их близких аналогов, включая ультракалиевые алюмосиликатные породы.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в развитие технологии комплексной переработки небокситового сырья сделан российскими специалистами, в том числе: В.А. Мазелем, В.Д. Пономаревым, Л.П. Ни, В.С. Сажиным, М.Г. Манвеляном, М.Н. Смирновым, Н.И. Ереминым, В.М. Сизяковым, В.Я. Абрамовым, В.И. Захаровым, А.И. Лайнером и Ю.А. Лайнером, Г.З. Насыровым, В.И. Корнеевым, А.И. Алексеевым и другими. Не менее весомым является вклад творческих коллективов Всероссийского алюминиево-магниевого института (ВАМИ), Института металлургии им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН), МИСИС, ИХТРЭМС КНЦ РАН, Пикалевского глиноземного завода, Ачинского глиноземного комбината и целого ряда

других исследовательских и производственных организаций. Заметное место в этом ряду занимают исследования зарегистрированной научной школы «Комплексная переработка сырья цветных, благородных и редких металлов» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II под руководством профессора Сизякова В.М., определившие пути дальнейшего повышения эффективности переработки нефелиновых руд и концентратов с получением новых видов попутной продукции. В то же время существенные изменения в сырьевой базе, возникновение новых вызовов, связанных с уменьшением углеродного следа, гармонизацией количества основной и попутной продукции, нуждаются в дальнейшей теоретической и технологической проработке.

Диссертационная работа выполнена на экспериментальной базе Научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Научного центра «Геомеханики и проблем горного производства» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, при поддержке Российского научного фонда по Соглашению № 18-19-00577 от 26.04.2018 и содействии Международного центра компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО по проекту «Наука» (г. Санкт-Петербург, Россия).

Объект исследования – технология комплексной переработки нефелинового сырья с получением глинозема и попутной продукции.

Предмет исследования – синтез гидрокарбоалюминатов кальция и рециклинг известкового компонента при комплексной переработке нефелиновых руд и концентратов.

Цель работы – разработка научно обоснованных технологических решений для синтеза гидрокарбоалюминатов кальция и рециклинга известкового компонента с эквивалентной заменой природного известняка в технологическом процессе производства глинозёма из нефелинового сырья, обеспечивающей уменьшение выхода нефелинового шлама и снижение эмиссии углекислого газа с получением продукции требуемого качества.

Идея заключается в концепции получения оборотного известкового компонента требуемого качества при переработке нефелинового шлама, удовлетворяющего требованиям его использования в технологических процессах производства глинозема из нефелино-

вого сырья, включая приготовление сырьевых смесей и шихт, синтез ГКАК и др.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

1. Анализ мировой практики производства глинозема из низкокачественного алюминийсодержащего сырья и путей повышения его эффективности, включая использование сырья с повышенным содержанием калия, гармонизацию соотношения основной и попутной продукции, уменьшение углеродного следа технологического процесса, снижение удельного расхода известняка и выхода отвального шлама.

2. Анализ теоретической обеспеченности процесса регенерации компонентов нефелинового шлама, путей использования оборотного известкового компонента и снижения углеродного следа в технологическом процессе производства глинозема из нефелинового сырья и его аналогов.

3. Научно-методическое обеспечение и экспериментальное исследование закономерностей формирования структуры и состава гидрокарбоалюминатов кальция в зависимости от природы щелочных металлов в алюминатном растворе.

4. Теоретическое обоснование, методическое обеспечение и экспериментальное исследование эффективности замещения природного известняка регенерированным известковым компонентом на перделе приготовления известняково-нефелиновой шихты и сырьевой портландцементной смеси.

5. Экспериментальное исследование путей повышения эффективности разделения силикатного и известкового компонентов в составе продуктов конверсии нефелинового шлама на основе осаждения двойного карбоната натрия и кальция ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

6. Разработка принципиальной технологической схемы комплексной переработки нефелиновых руд и концентратов, обеспечивающей регенерацию и рециклинг известкового компонента, снижение углеродного следа технологического процесса, гармонизацию соотношения основной и попутной продукции.

Научная новизна:

1. Установлено аддитивное изменение показателей синтеза гидрокарбоалюмината кальция (ГКАК) в щелочных алюминатных растворах по степени конверсии оксида кальция в ГКАК и его вы-

ходу, содержанию ГКАК в осадке и его насыщению по CO_2 в зависимости от соотношения натрия и калия в растворе.

2. Термодинамическими расчетами определена вероятность протекания процесса углекислотной конверсии ортосиликата кальция с образованием известкового и силикатного компонентов независимо от сочетания полиморфных модификаций ортосиликата и карбоната кальция.

3. Установлено долевое распределение потока регенерированного известкового компонента для производства портландцемента и приготовления известняково-нефелиновой шихты глиноземного производства в зависимости от степени углекислотной конверсии нефелинового шлама и его части необходимой для экономически обоснованного производства портландцементного клинкера.

4. Экспериментально установлена зависимость формирования крупнокристаллического осадка двойного карбоната натрия и кальция (пирссонита) при содовой обработке кальцита в присутствии затравочных кристаллов пирссонита, что даёт многократное увеличение скорости этого процесса.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.2. Metallurgy черных, цветных и редких металлов по пунктам: п.4. «Термодинамика и кинетика металлургических процессов»; п.7 «Рециклинг материалов, переработка отходов производства и потребления»; п.9. «Энергосбережение, утилизация отходов металлургического производства, снижение выбросов, в том числе парниковых газов»; п.19 «Гидрометаллургические процессы и агрегаты».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Показана результативность синтеза ГКАК в системах глиноземного производства не зависимо от соотношения щелочных металлов в технологических растворах, что создает необходимые предпосылки для его получения при переработке как бесщелочного сырья, так и щелочных алюмосиликатов с повышенным содержанием калия.

2. Предложена оригинальная методика комплексного физико-химического анализа продуктов синтеза ГКАК, позволяющая установить основные показатели его получения, стехиометрию и степень насыщения по CO_2 , что позволило разработать и

зарегистрировать программу для расчета химического и вещественного состава твердых растворов на основе алюминатов щелочноземельных металлов (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2024682672).

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повторного использования регенерированного известкового компонента в производстве глинозема и портландцемента с эквивалентной заменой природного известняка в составе сырьевых смесей и шихт, что позволяет гармонизировать соотношение основной и попутной продукции, обеспечивает соответствующее снижение эмиссии углекислого газа при переработке нефелинового сырья (Патент РФ № 2 865 057. Способ комплексной переработки нефелинового сырья).

4. Получили развитие фундаментальные основы разделения по крупности силикатного и известкового компонента на основе формирования крупнокристаллического осадка пиррсонита, ускоренное образование которого обеспечивается введением установленного количества затравочного материала

5. Научные и практические результаты могут быть использованы в учебном процессе с их включением в лекционные курсы и лабораторные практикумы при подготовке специалистов по направлению «Металлургия» и «Технология неорганических веществ».

6. Результаты исследования позволяют сократить расход известняка, уменьшить выход нефелинового шлама и отведение земель для его складирования, что подтверждается актом об использовании результатов диссертации в деятельности ООО «ЭКО-Инжиниринг» от 01.06.2026.

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, включая термодинамический и кинетический анализ систем и протекающих в них процессов. Исследование технологических материалов и продуктов выполнялось с применением известных отраслевых методик, а также высокотехнологичных методов лазерного микроанализа частиц, рентгеновской дифрактометрии, рентгенофлуоресцентного и термического анализа, оптической и электронной микроскопии. При выполнении экспериментальных исследований применялось физическое моделирование технологических процессов

и систем. На отдельных этапах обработки данных использованы стандартные и специализированные программные пакеты.

Положения, выносимые на защиту:

1. Показатели синтеза гидрокарбоалюминатов кальция с высокой степенью насыщения по содержанию CO_2 имеют аддитивную зависимость от природы катиона щелочного металла в алюминатном растворе, установление которой возможно с использованием оригинальной методики комплексного физико-химического анализа продуктов взаимодействия алюминатного раствора и известкового компонента.

2. Получение оборотного известкового компонента требуемого качества и его рециклинг в технологическом процессе переработки нефелинового сырья обеспечивается гидрохимической обработкой нефелинового шлама с достижением степени конверсии ортосиликата кальция в его составе не менее 90 %, последующим разделением компонентов силикатно-карбонатного шлама на основе эффективной кристаллизации пиррсонита.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена их соответствием известным тенденциям развития производства глинозема, ранее выполненным исследованиям и разработкам, а также доказываемая с позиций современной теории металлургических процессов и практики осуществления аналогичных процессов, статистической значимостью факторов, использованных в экспериментальных исследованиях, применением высокотехнологичных методов физико-химического анализа и обработки данных.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих научно-технических мероприятиях: XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (16-20 мая 2022, г. Санкт-Петербург); VIII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов (24-25 мая 2022, г. Донецк); XII Международный Конгресс и Выставка «Цветные металлы и минералы» (09-13 сентября 2024, г. Красноярск); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (21-25 октября 2024, г. Санкт-Петербург); III Международная научно-практическая конференция «Современные технологии производства цветных металлов» (23-24 мая 2025, г. Екатеринбург); XXI Всероссийская конферен-

ция-конкурс проектов «Актуальные проблемы недропользования» (6-10 апреля 2026, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе сырьевой базы и технологических процессов переработки низкосортного алюминиевого сырья, физико-химическом обосновании предполагаемых технических решений, организации и проведении экспериментальных исследований, включая выбор, разработку и практическое применение известных и оригинальных методов исследования, обобщение полученных результатов, а также их апробацию и подготовку материалов к публикации.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено: 1 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 1 - Патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка, списка литературы, включающего 136 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 30 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность сотрудникам кафедры металлургии и факультета переработки минерального сырья, НЦ «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», НЦ «Геомеханики и проблем горного производства» и ЦКП Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за внимание, содействие и поддержку на различных этапах выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, дана оценка научной новизны результатов, раскрыты теоретическая и практическая зна-

чимость исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показано, что применительно к условиям Российской Федерации, стран СНГ и других регионов мира, не обладающих в достаточной степени традиционными ресурсами для производства алюминия, наиболее перспективным сырьем являются щелочные алюмосиликаты различной природы, повышение эффективности переработки которых связано решением комплекса актуальных задач, включая увеличение глубины переработки силикатно-кальциевого (нефелинового) шлама и снижение углеродного следа технологического процесса. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы была сформулирована цель и основные задачи научного исследования.

Во второй главе выполнен анализ теоретической и технологической обеспеченности синтеза гидрокарбоалюминатов кальция при переработке щелочных алюмосиликатов различного минерального состава, в том числе с использованием известковых компонентов природного и техногенного происхождения. Рассмотрены фундаментальные и технологические аспекты снижения углеродного следа переработки нефелинового сырья, гармонизации соотношения основной и попутной продукции, в том числе на основе регенерации и рециклинга известкового компонента в рамках известных и предполагаемых технологических процессов. В конце второй главы сформулированы выводы и определены задачи экспериментального исследования в рамках.

В третьей главе приведены материалы методического обеспечения и экспериментального исследования получения ГКАК в системах глиноземного производства и в лабораторных условиях с использованием синтетических растворов в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ и $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$, что создает необходимые предпосылки для его получения при переработке как бесщелочного сырья, так и щелочных алюмосиликатов с повышенным содержанием калия. Изложены материалы разработки и использования оригинальной методики комплексного физико-химического анализа осадков при синтезе ГКАК, основанной на определении фазового состава продуктов и учете характерных химических изменений системы при взаимодействии известкового компонента с алюминатным раствором.

В четвертой главе приведены результаты методической проработки и экспериментального исследования закономерностей синтеза пиррсонита в процессе содовой обработки известковых материалов различного фазового состава, в том числе интенсификации процесса на основе использования синтетической затравки, составляющих фундаментальную основу разделения по крупности силикатного и известкового компонента в составе продуктов углекислотной конверсии нефелинового шлама.

В пятой главе приведены материалы экспериментального исследования закономерностей разделения силикатной и известковой составляющей в составе продуктов конверсии нефелинового шлама, приготовления известняково-нефелиновых шихт и сырьевых портландцементных смесей с использованием оборотного известкового компонента для условий регламентированного производства портландцемента в качестве попутной продукции. Дана характеристика принципиальных аппаратно-технологических решений, учитывающих аспекты регенерации и рециклинга известкового в производстве глинозема из нефелинового сырья. Приведена технико-экономическая и экологическая оценка эффективности предложенных технических решений.

Основные результаты работы отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Показатели синтеза гидрокарбоалюминатов кальция с высокой степенью насыщения по содержанию CO_2 имеют аддитивную зависимость от природы катиона щелочного металла в алюминатном растворе, установление которой возможно с использованием оригинальной методики комплексного физико-химического анализа продуктов взаимодействия алюминатного раствора и известкового компонента.

Ключевым моментом спекательной технологии переработки нефелинового сырья является крупномасштабное использование известковых компонентов, необходимых для связывания кремнезёма и его отделения от алюминия, для формирования алитового состава портландцементного клинкера, для каустификации соды и глубокого обескремнивания алюминатных растворов. В этой связи особое значение приобретает качество известковых материалов, возможность их повторного применения в указанных технологических сферах и решение связанных с этими процессами задач.

При исследовании синтеза ГКАК в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ и $\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ были использованы известные методические подходы и зарекомендовавшее себя оборудование – multifunctional платформа AutoMate, оснащенная четырьмя реакторами из нержавеющей стали объемом по 0,5 л каждый для параллельного осуществления процессов при атмосферном давлении в режиме контролируемой агитации пульпы, с возвратом конденсата и поддержанием температуры с точностью $\pm 0,1$ °C. Синтез выполнялся в однотипных условиях при дозировке извести 1 моль CaO на 1 моль Al_2O_3 в растворе, при температуре раствора 60 °C и длительности процесса 60 минут, что удовлетворяет существующей теории и практике их получения. По окончании изотермической выдержки пульпа подвергалась фильтрованию под вакуумом, осадок промывали дистиллированной водой и высушивали до постоянной массы для последующего анализа и выполнения физико-химических исследований, а фильтрат анализировали на содержание Al_2O_3 и щелочных компонентов. При этом были использованы соответствующие методы исследования образцов и оборудование для лазерного микроанализа, совмещенного термоанализа, рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии.

В этой связи была предложена оригинальная методика комплексного физико-химического анализа ГКАК, основанная на определении и учете фазового состава осадка и характерных химических изменений системы при взаимодействии известкового компонента с алюминатным раствором. Данный подход позволяет формализовать материальный баланс четырех компонентов (CaO , Al_2O_3 , CO_2 , H_2O), участвующих в синтезе ГКАК ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{CO}_2 \cdot (13-2n) \text{H}_2\text{O}$) с возможностью образования четырех твердых веществ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; CaCO_3 ; C_3AH_6 и ГКАК). Это создает условия для оценки степени гидратации ГКАК, его насыщения карбонат-ионом и определения количества фазы посредством решения системы уравнений (1) – (5):

$$m_{\text{CaO}} = m_{\text{CaO}}^{\text{Ca}(\text{OH})_2} + m_{\text{CaO}}^{\text{CaCO}_3} + m_{\text{CaO}}^{\text{ГКАК}} + m_{\text{CaO}}^{\text{ТКГА}}, \quad (1)$$

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2}^{\text{ГКАК}} + m_{\text{CO}_2}^{\text{CaCO}_3}, \quad (2)$$

$$m_{\text{Al}_2\text{O}_3} = m_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{ГКАК}} + m_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{ТКГА}}, \quad (3)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Ca}(\text{OH})_2} + m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ГКАК}} + m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ТКГА}}, \quad (4)$$

$$m_{\text{осадка}} = m_{\text{CaO}} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{Al}_2\text{O}_3} + m_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (5)$$

В уравнениях (1) – (5) введены следующие обозначения: масса соответствующего компонента в осадке и масса осадка или его пробы для анализа в левой части уравнений; верхние индексы соответствуют фазе, в состав которой входит соответствующий компонент; ТКГА – сокращенное наименование трехкальциевого гидроалюмината ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или C_3AH_6). Потенциальная возможность образования ТКГА связана с метастабильной устойчивостью ГКАК, а переход в осадок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 с неполным завершением синтеза ГКАК в алюминатном растворе. Левые части уравнений содержат известные величины, которые определяются условиями эксперимента (m_{CaO} и $m_{\text{осадка}}$), результатами химического и термического анализа (m_{CO_2} , $m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $m_{\text{H}_2\text{O}}$).

Количественные показатели лабораторного синтеза ГКАК с учетом трех параллельных опытов устанавливались для алюминатных растворов с мольной долей K_2O 0,0 и 1,0. Расчет мольной доли щелочного металла в растворе выполнялся по уравнению (6):

$$n_{\text{K}_2\text{O}} = \frac{v_{\text{K}_2\text{O}}}{v_{\text{K}_2\text{O}} + v_{\text{Na}_2\text{O}}} = \frac{[\text{K}_2\text{O}]/94}{[\text{K}_2\text{O}]/94 + [\text{Na}_2\text{O}]/62}, \quad n_{\text{Na}_2\text{O}} = 1 - n_{\text{K}_2\text{O}}, \quad (6)$$

где $n_{\text{Na}_2\text{O}}$ и $n_{\text{K}_2\text{O}}$ – мольная доля Na_2O и K_2O в алюминатном растворе; $[\text{Na}_2\text{O}]$ и $[\text{K}_2\text{O}]$ – объемные концентрации компонентов г/л; 62 и 94 – соответственно молекулярная масса Na_2O и K_2O , г/моль.

При определении количественного фазового состава осадка ГКАК были использованы усредненные значения показателей и составов продуктов, что повышает точность и достоверность полученных результатов. Химический состав осадка определялся рентгенофлуоресцентным методом с использованием анализатора EDX-7000P, результаты которого дополнялись определением содержания углерода на анализаторе ТОС-L и потерь при прокаливании, обусловленных удалением кристаллогидратной и химически связанной воды, по результатам синхронного термоанализа на приборе DTG-60, выполненного при постоянной скорости нагрева 15 °С/мин в интервале температур от 25 °С до 1000 °С.

Для установления фазового состава синтезированных продуктов был выполнен анализ образцов на дифрактометре XRD 6000, который с учетом доступной базы данных позволил идентифицировать в качестве основных кристаллических компонентов осадка $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и ГКАК, но без его привязки к величине насыщения по CO_2 . В этой связи для уточнения фазового состава осадков был проведен

их синхронный термоанализ на приборе DTG-60 в ранее приведенном режиме. Полученные данные в значительной степени дополняют теоретические представления и результаты XRD анализа о качественном составе, что позволяет применить расчетные уравнения (1) – (5) для установления количества индивидуальных веществ в осадке и химического состава ГКАК (таблицы 1 и 2). При этом можно отметить закономерное изменение показателей синтеза и состава, полученного ГКАК, в зависимости от природы щелочного металла и известкового компонента, а также условий его термообработки в лабораторных и заводских условиях.

Исследование гранулометрического состава образцов было выполнено на лазерном анализаторе частиц Микросайзер 201С, а его результаты приведены на рисунке 1. Для уточнения структурно-текстурных особенностей твердых продуктов был выполнен их сравнительный анализ с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3. Морфологические и гранулометрические характеристики образцов достаточно близки, но имеются и заметные различия в структуре кристаллических агрегатов, степени окристаллизованности и размере индивидов, что находит отражение в таком совокупном показателе осадка, как распределение частиц по крупности, сложный характер которого может быть связан с многостадийностью формирования фракционного состава под влиянием ряда независимых и существенных факторов (рисунок 2).

2. Получение оборотного известкового компонента требуемого качества и его рециклинг в технологическом процессе переработки нефелинового сырья обеспечивается гидрохимической обработкой нефелинового шлама с достижением степени конверсии ортосиликата кальция в его составе не менее 90 %, последующим разделением компонентов силикатно-карбонатного шлама на основе эффективной кристаллизации пиррсонита.

Понижение силикатного модуля смеси сырьевых компонентов является одним из основных факторов переработки алюмосиликатов, определяющим расход природного известняка и эмиссию углекислого газа в окружающую среду согласно уравнению (7), а также приведенным на рисунке 3 расчётным зависимостям для спекания известняково-нефелиновой шихты:

$$m'_{изв} = \frac{\alpha'_{изв} (SiO_2)_{см}}{(Al_2O_3)_{см} \varepsilon_{Al_2O_3}} \frac{100}{60} = \frac{\alpha'_{изв} 100}{\varepsilon_{Al_2O_3} 102} M_{сил}^{см}, \quad m'_{угл} = \frac{\alpha'_{изв} 44}{\varepsilon_{Al_2O_3} 102} M_{сил}^{см}, \quad (7)$$

где $m'_{изв}$, $m'_{угл}$ – удельный расход известняка и удельная эмиссия углекислого газа на единицу полученного Al_2O_3 ; $(Al_2O_3)_{см}$ и $(SiO_2)_{см}$ – содержание Al_2O_3 и SiO_2 в смеси сырьевых компонентов; $\alpha'_{изв}$ – известковый модуль спекательной шихты; $\varepsilon_{Al_2O_3}$ – товарный выход Al_2O_3 ; 102, 100, 60 и 44 – соответственно молекулярный вес Al_2O_3 , $CaCO_3$, SiO_2 и CO_2 ; $M_{сил}^{см}$ – силикатный модуль смеси сырьевых компонентов шихты, определяемый уравнением (8):

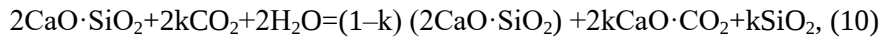
$$M_{сил}^{см} = M_{сил}^{исх} \frac{1 + m_2 (SiO_2)_{доб} / m_1 (SiO_2)_{исх}}{1 + m_2 (Al_2O_3)_{доб} / m_1 (Al_2O_3)_{исх}}, \quad (8)$$

где $M_{сил}^{исх}$ – силикатный модуль исходного сырья; m_1 и m_2 – соответственно количество исходного сырья и алюминийсодержащей добавки; $(Al_2O_3)_{исх}$, $(Al_2O_3)_{доб}$, $(SiO_2)_{исх}$ и $(SiO_2)_{доб}$ – соответственно содержание Al_2O_3 и SiO_2 в исходном сырье и алюминийсодержащей добавке.

Заметно большей универсальностью обладает технологический подход, заключающийся в регенерации и повторном использовании известкового компонента при переработке щелочных алюмосиликатов. В основе такого подхода лежит термодинамическая неустойчивость полиморфных модификаций ортосиликата кальция в составе силикатно-кальциевого шлама, что делает возможным получение обратного известкового компонента по уравнению (9):



Обязательным условием повторного использования известкового компонента является соблюдение требований по содержанию SiO_2 (не более 2-3 %), что отвечает качеству известняка соответственно 1-го и 2-го сорта. Это позволяет установить зависимость теоретического состава регенерированного известкового компонента, его известкового модуля и теоретического выхода от степени конверсии ортосиликата кальция в составе шлама по уравнению (10):



где k – степень конверсии оксида кальция в составе ортосиликата с образованием карбоната кальция.

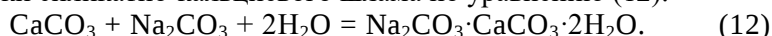
Расчеты, выполненные по уравнению (10), показывают теоретическую возможность достижения достаточно низких значений

содержания SiO_2 в известковом компоненте после его регенерации путем гидрохимической обработки силикатно-кальциевого шлама. При этом выполнение требования по получению карбонатного материала с массовой долей SiO_2 менее 3 % отвечает степени конверсии более 90 %, что обеспечивает высокую эффективность его участия в технологических процессах спекания щелочных алюмосиликатов, при обжиге портландцементного клинкера и в других процессах. Задача распределения потоков регенерированного известкового компонента решалась применительно к 100 %-ной утилизации нефелинового шлама в зависимости от качества регенерированного компонента и количественного соотношения основной (глинозем) и попутной продукции (портландцемент). Тогда применительно к сырьевой портландцементной смеси алитового состава получаем уравнение (11), учитывающее распределение потоков регенерированного известкового компонента для различной степени конверсии ортосиликата кальция в составе нефелинового шлама (рисунок 4):

$$\alpha_{изв}^{см} = \frac{x + (1-x)y}{x/\alpha_{изв}^I + (1-x)y/\alpha_{изв}^{III}} = 3,0, \quad (11)$$

где x – доля потока нефелинового шлама для приготовления сырьевой портландцементной смеси алитового состава; y – доля потока известкового компонента для приготовления сырьевой портландцементной смеси; $\alpha_{изв}^I$ и $\alpha_{изв}^{III}$ – соответственно известковый модуль нефелинового шлама и известкового компонента.

Результаты экспериментального приготовления сырьевых смесей и известняково-нефелиновых шихт требуемого состава с учетом заданного соотношения основной и попутной продукции приведены в таблицах 3 и 4. При этом существенное значение для рециклинга известкового компонента имеет как степень конверсии ортосиликата кальция по уравнению (10), так и эффективное разделение компонентов образующегося силикатно-карбонатного шлама с получением обратного известкового компонента требуемого качества, что обеспечивается использованием известного технологического приема в виде щелочного растворения кремнегеля. Альтернативный подход заключается в разделении по крупности силикатного и известкового компонентов на основе выделения крупнокристаллического осадка пиррсонита, образующегося в процессе содовой обработки силикатно-кальциевого шлама по уравнению (12):



Экспериментальное исследование закономерностей синтеза пирссонита выполнялось с использованием чистых препаратов, полученных в лабораторных условиях и соответствующих фазовому составу кальцита, арагонита и портландита. Схема постановки экспериментов, результаты синтеза и микрофотографии продуктов приведены на рисунках 5-8. С целью интенсификации процесса, кинетические кривые которого позволяют говорить о лимитирующей стадии зародышеобразования, был выполнен синтез затравочного пирссонита. Формирование химически чистого препарата осуществляли по оригинальной методике, обеспечивающей получение мономинерального осадка, фазовая однородность которого устанавливалась экспериментально и подтверждалась результатами рентгенофазового анализа. По данным о положении и интенсивности дифракционных максимумов, обработанных в программном комплексе Profex, были определены параметры элементарной ячейки синтетического пирссонита: $a = 11,337 \text{ \AA}$, $b = 20,067 \text{ \AA}$, $c = 6,035 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $V = 1372,888 \text{ \AA}^3$. Полученные кристаллографические характеристики, уточненные на основе метода Ритвельда, согласуются с эталонными значениями (COD ID:9009889), что свидетельствует о структурной идентичности синтезированного продукта и высокой степени упорядоченности его атомно-молекулярного строения. Последующая интерпретация расчетных данных в специализированном программном пакете VESTA позволила визуализировать пространственную структуру пирссонита (рисунок 9) в виде полиэдрической модели, демонстрирующей связь координационных многогранников кальция и натрия. При этом особенности внутренней организации с упорядоченным расположением кристаллизационной воды позволяют говорить о природе его высокой реакционной способности.

Результаты выделения пирссонита по уравнению (12) с использованием кальцита и синтетической затравки пирссонита приведены на рисунках 10 и 11, что позволяет говорить о справедливости высказанной гипотезы в связи с лимитирующей ролью образования первичных центров кристаллизации и возможностью существенной интенсификации процесса. Так как в реальных технологических системах одновременно с карбонатом кальция обязательно присутствует силикатный компонент, то на завершающей стадии исследования синтез пирссонита выполнялся в присутствии примеси кремнезема в форме кремнегеля, предельное количество которого

определялось стехиометрическим соотношением CaO и SiO_2 в нефелиновом шламе и продуктах его углекислотной конверсии. Полученные результаты показывают несущественное влияние примеси как на скорость кристаллизации пирсонита, так и его кристаллофизические свойства, определяющие возможность эффективного разделения по крупности силикатного и известкового компонентов.

Не зависимо от способа их разделения возможность радикального сокращения, потребляемого в технологическом процессе природного известняка, снижение эмиссии углекислого газа, гармонизация соотношения основной и попутной продукции при переработке нефелинового сырья определяются регенерацией известкового компонента и его распределением на переделы приготовления известняково-нефелиновой шихты и сырьевой портландцементной смеси, что является отличительной чертой разработанного и запатентованного способа комплексной переработки нефелинового сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведен анализ мировой практики производства глинозёма из низкокачественного алюминиевого сырья и путей повышения эффективности и экологической безопасности его использования.

2. Теоретически обосновано доленое распределение потока регенерированного известкового компонента для производства портландцемента и приготовления известняково-нефелиновой шихты глинозёмного производства в зависимости от степени углекислотной конверсии нефелинового шлама и его части необходимой для экономически обоснованного производства клинкера алитового состава. Показана термодинамическая вероятность протекания процесса углекислотной конверсии ортосиликата кальция с образованием известкового и силикатного компонентов независимо от сочетания полиморфных модификаций ортосиликата и карбоната кальция, а также установлена принципиальная возможность пассивации поверхности ортосиликата кальция продуктами конверсии, преодоление которой обеспечивается механизмом формирования осадков с малым диффузионным сопротивлением.

3. Разработана и результативно использована оригинальная методика комплексного физико-химического анализа сложных гидрокарбоалюминатов кальция, основанная на определении фазового

состава осадка при синтезе гидрокарбоалюмината кальция (ГКАК) и характерных химических изменений системы в процессе взаимодействия известкового компонента с алюминатным раствором. Установлено аддитивное изменение показателей синтеза ГКАК при участии растворов в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ по степени конверсии оксида кальция в ГКАК и его выходу, содержанию ГКАК в осадке и его стехиометрии с насыщением по CO_2 соответственно от 0,79 до 0,62 моль с ростом мольной доли K_2O от 0 до 1,0.

4. Экспериментально подтверждено влияние типа кальцийсодержащего реагента на результативность гетерогенного взаимодействия с образованием пиррсонита, что проявляется в существенном различии количественных показателей процесса. Установлена кинетическая зависимость формирования крупнокристаллического осадка двойного карбоната натрия и кальция при содовой обработке кальцита в присутствии затравочных кристаллов пиррсонита, обеспечивающих многократное увеличение скорости этого процесса.

5. Экспериментально подтверждена возможность вовлечения регенерированного известкового компонента в производство глинозёма и портландцемента в зависимости от его долевого распределения с эквивалентной заменой природного известняка в составе сырьевых смесей и шихт, удовлетворяющих базовым показателям их качества по величине щелочного и известкового модуля. Установлены закономерности снижения углеродного следа технологии комплексной переработки нефелинового сырья в зависимости от доли потока исходного шлама, поступающего на углекислотную обработку, и степени конверсии ортосиликата кальция.

Перспективы дальнейшего развития данного научного направления заключаются в повышении эффективности разработанных технологических решений по снижению эмиссии парниковых газов при комплексной переработке нефелинового сырья, а также их последующем внедрении в производственный сектор экономики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Бричкин, В.Н. Производство глинозема: исторические этапы развития, проблемы и пути их решения. Часть 1. / В.Н. Брич-

кин, В.В. Васильев, **Р.И. Максимова** // iPolytech Journal. – 2023. – Т.27. – № 3. – С. 583-597.

2. Sizyakov, V.M. Synthesis, properties and applications of complex calcium aluminates and hydroaluminates / V.M. Sizyakov, V.N. Brichkin, R.V. Kurtenkov, **R.I. Maksimova** // Non-ferrous Metals. – 2025. – № 1. – P. 10-17.

3. **Maksimova, R. I.** Recycling of the lime component in the complex processing of alkaline aluminosilicates / **R. I. Maksimova**, V. M. Sizyakov, V. N. Brichkin, R. V. Kurtenkov // Obogashchenie Rud. – 2026. – № 2. – P. 22-32.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

4. Brichkin, V. N. Production and recycling of limes in integrated mineral processing / V. N. Brichkin, V. V. Vasiliev, I. S. Bormotov, **R. I. Maksimova** // Gornyi Zhurnal. – 2021. – № 11. – P. 88-94.

5. Brichkin, V. N. Regeneration and recycling of lime component in complex processing of kaolin raw materials / V. N. Brichkin, R. V. Kurtenkov, **R. I. Maksimova**, I. S. Bormotov // Obogashchenie Rud. – 2024. – № 4. – P. 32-38.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682672 Российская Федерация. Программа для расчёта химического и вещественного состава твёрдых растворов на основе сложных алюминатов щелочноземельных металлов. Заявка № 2024680941: заявл. 11.09.2024: опубл. 26.09.2024 / В.Н. Бричкин, **Р.И. Максимова**, А.Т. Федоров; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1с.

7. Патент № 2865057 С1 Российская Федерация, МПК C22B 21/00 (2006.01); C01F 7/38 (2006.01). Способ комплексной переработки нефелинового сырья. Заявка № 2025129286 : заявл. 24.10.2025 : опубл. 30.06.2026 / В.М. Сизяков, В.Н. Бричкин, Р.В. Куртенков, **Р.И. Максимова**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13с.

Таблица 1 – Количественный фазовый состав осадка при синтезе ГКАК в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (№ 1-3), $\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (№ 4-6) и в заводских условиях (№ 7)

№№ опыта (образца)	Количественный фазовый состав синтезированных образцов, %				
	ГКАК	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CaCO_3	прочие	ИТОГО
1	90,83	6,75	1,12	1,30	100,00
2	87,94	9,92	0,35	1,79	100,00
3	92,50	4,40	1,31	1,79	100,00
Среднее, 1-3	90,43	7,02	0,93	1,62	100,00
4	85,98	11,36	1,59	1,07	100,00
5	85,96	7,98	4,85	1,21	100,00
6	84,19	9,76	4,99	1,06	100,00
Среднее, 4-6	85,37	9,70	3,81	1,11	100,00
7	86,52	10,73	0,58	2,17	100,00

Таблица 2 - Расчетный стехиометрический состав ГКАК в синтезированных образцах

№№ опыта (образца)	Стехиометрическая формула ГКАК на моль Al_2O_3	Степень конверсии CaO в ГКАК, %	Выход ГКАК на единицу CaO , %
1	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,85\text{CO}_2 \cdot 11,56\text{H}_2\text{O}$	86,89	218,21
2	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,83\text{CO}_2 \cdot 11,16\text{H}_2\text{O}$	82,66	204,75
3	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,69\text{CO}_2 \cdot 9,75\text{H}_2\text{O}$	91,35	213,53
Среднее, 1-3	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,79\text{CO}_2 \cdot 10,82\text{H}_2\text{O}$	86,97	212,16
4	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,78\text{CO}_2 \cdot 12,02\text{H}_2\text{O}$	74,19	199,08
5	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,55\text{CO}_2 \cdot 11,03\text{H}_2\text{O}$	81,60	194,73
6	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,53\text{CO}_2 \cdot 11,03\text{H}_2\text{O}$	78,62	187,53
Среднее, 4-6	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,62\text{CO}_2 \cdot 11,36\text{H}_2\text{O}$	79,04	193,78
7	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,45\text{CO}_2 \cdot 10,62\text{H}_2\text{O}$	—	—

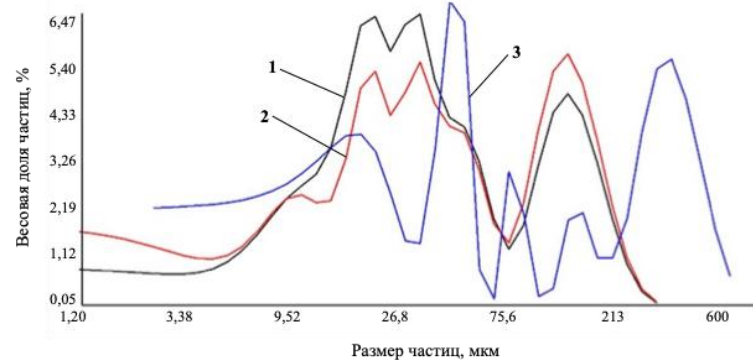


Рисунок 1 – Усреднённые данные распределения по крупности частиц в осадках при синтезе ГКАК: 1 – № 1-3; 2 – № 4-6; 3 – № 7 (№ опытов в соответствии с табл. 1)

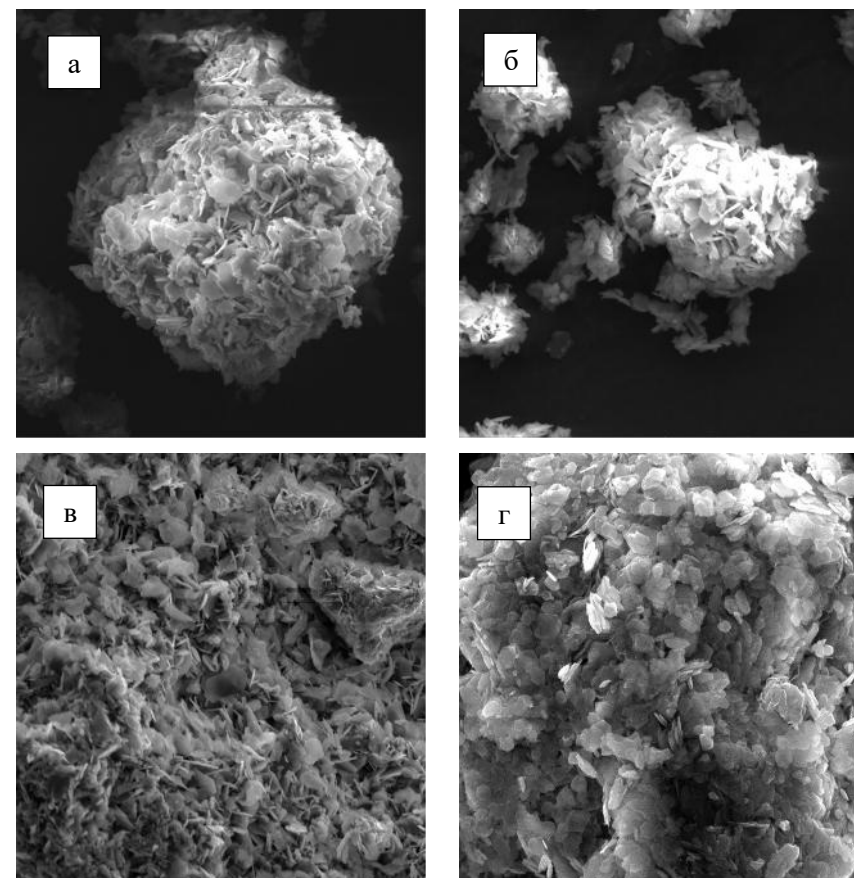


Рисунок 2 – Микрофотографии продуктов синтеза ГКАК при различной мольной доли щелочных металлов в алюминатном растворе: а – $n_{\text{Na}_2\text{O}}=1,0$; б, в – $n_{\text{K}_2\text{O}}=1,0$; г – $n_{\text{Na}_2\text{O}}=0,7$

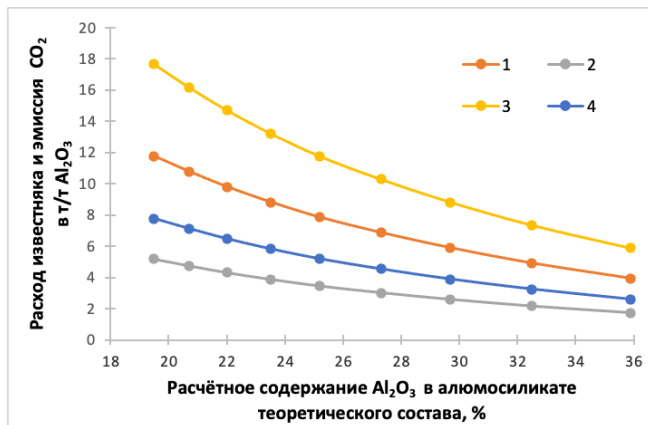


Рисунок 3 – Теоретический расход известняка и расчетная эмиссия CO₂ при спекании шихты в зависимости от теоретического содержания Al₂O₃ в исходном сырье: 1, 2 – при спекании нефелино-известняковой шихты; 3, 4 – при получении портландцементного клинкера

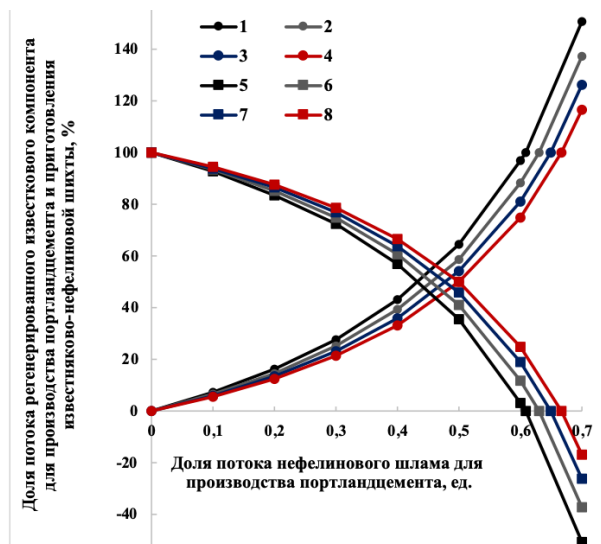


Рисунок 4 – Распределение потоков регенерированного известкового компонента для производства портландцемента (кривые 1-4) и приготовления известняково-нефелиновой шихты (кривые 5-8) при степени конверсии ортосиликата кальция, соответственно в %: 85,0; 90,0; 95,0 и 100,0

Таблица 3 – Показатели гидрохимической обработки нефелинового шлама и приготовления сырьевой портландцементной смеси

№№ Опытов	Степень конверсии, %	Показатели состава известкового компонента			Показатели приготовления сырьевой портландцементной смеси*			
		CaO, %	SiO ₂ , %	$\alpha_{изв}^{III}$	у, доли ед.	х, доли ед.	Выход сырьевой п/ц смеси в % от массы неф. шлама	$\alpha_{изв}^{см}$
1	74,8	53,10	7,01	8,12	—	—	—	—
2	87,3	52,32	3,37	16,63	—	—	—	—
3	91,5	52,06	2,13	26,30	1,0	0,6433	103,81	3,02
					0,5	0,4742	76,52	3,03
					0,0	0,0	0,0	—
4	94,1	36,02	1,56	35,36	0,9	0,6265	100,29	3,01
					0,5	0,5176	77,15	3,02
					0,1	0,1571	25,13	3,02
5	97,8	51,67	0,36	153,78	0,75	0,5996	93,45	3,00
					0,5	0,4996	77,86	3,01
					0,25	0,3333	51,92	3,01

*Принятые в таблице сокращения и обозначения: неф. – нефелиновый; $\alpha_{изв}^{см}$ – известковый модуль сырьевой портландцементной смеси.

Таблица 4 – Показатели приготовления известняково-нефелиновой шихты с использованием регенерированного известкового компонента

№№ опытов	(1-у)** доли ед.	Компонентный состав и выход известняково- нефелиновой шихты в % от массы неф. шлама					Степень замещения известняка изв. комп., %	$\alpha_{изв}^{ших}$	$\alpha_{изв}^{ших}$
		неф. конц.**	известняк	изв. комп.***	сода	выход шихты			
3	0,00	64,49	108,11	—	1,19	173,79	0,0	0,99	1,99
	0,50	64,41	79,77	29,1	1,36	174,64	26,15	1,00	2,01
	1,00	64,07	—	110,69	1,84	176,60	100,0	1,01	2,02
4	0,10	64,52	104,05	4,17	1,24	173,98	3,80	1,00	1,99
	0,50	64,74	80,03	28,91	1,59	175,27	26,27	1,00	2,00
	0,90	65,23	25,81	84,73	2,36	178,13	76,40	1,01	2,01
5	0,25	64,88	97,29	11,16	1,35	174,68	10,56	0,99	2,00
	0,50	65,48	81,06	27,90	1,60	176,04	26,16	1,00	2,01
	0,75	68,92	54,04	55,77	2,04	180,77	51,51	1,01	2,02

Примечания

* Из таблицы исключены опыты 1 и 2 как не удовлетворяющие требованию по содержанию SiO₂ в известковом компоненте.

** у – доля известкового компонента для приготовления сырьевой портландцементной смеси; (1-у) – доля известкового компонента для приготовления известняково-нефелиновой шихты.

*** Принятые сокращения: неф. конц. – нефелиновый концентрат; изв. комп. – известковый компонент.

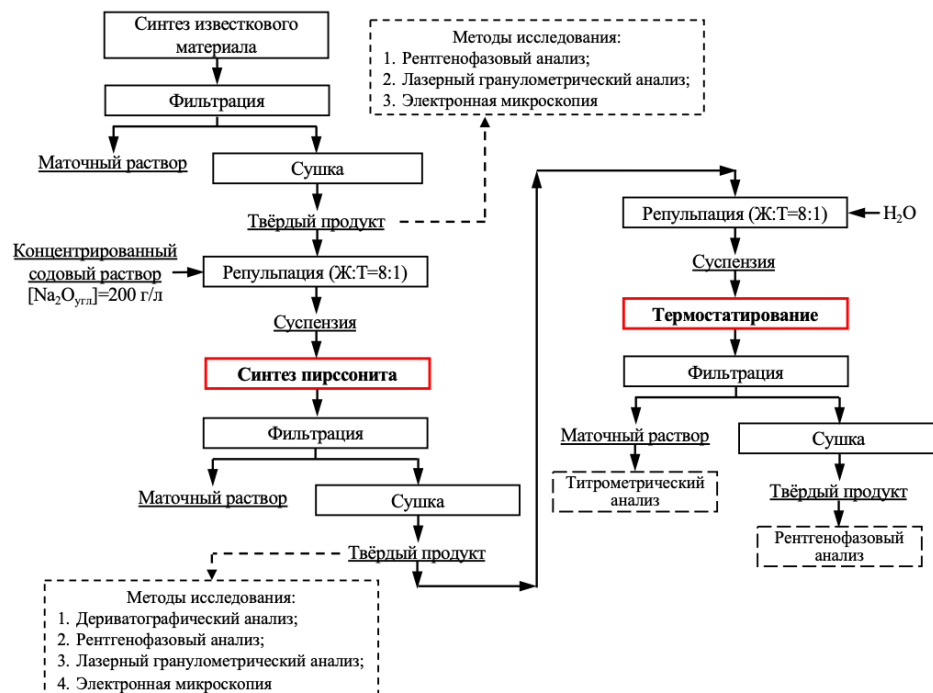


Рисунок 5 – Схема постановки экспериментов по синтезу двойного карбоната натрия и кальция (пирсонита)

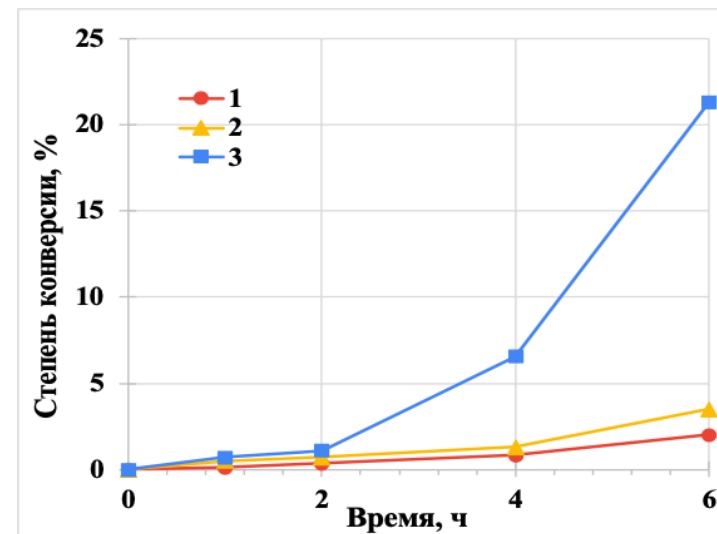


Рисунок 6 – Влияние природы известкового компонента на степень конверсии CaO в пирсонит: 1 – кальцит; 2 – арагонит; 3 – портландит

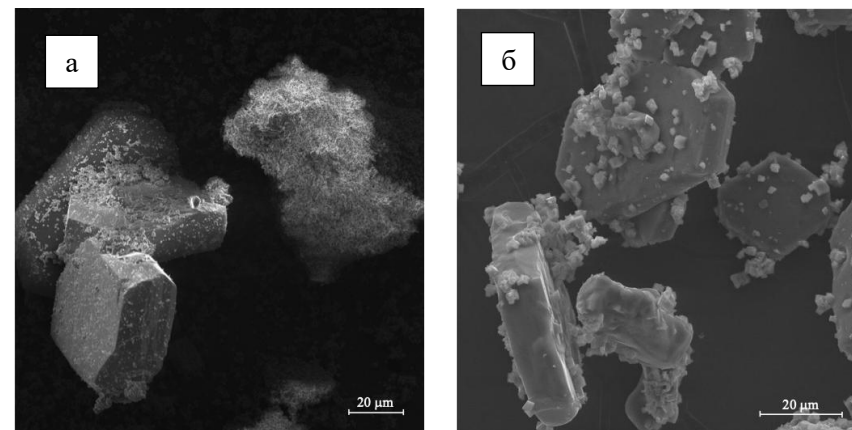


Рисунок 7 – Электронные микрофотографии продуктов синтеза пирсонита с использованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при различной длительности гидрохимической обработки: а – 4 ч.; б – 6 ч.

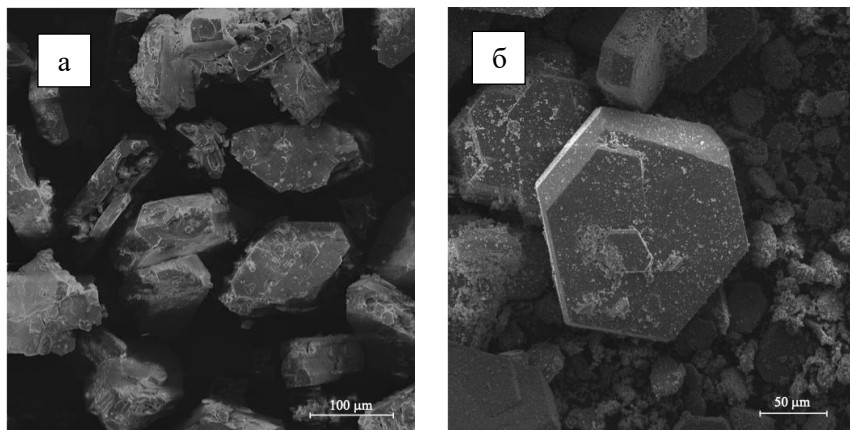


Рисунок 8 – Электронные микрофотографии затравки пирссонита (а) и кристаллов синтезированного пирссонита (б) при продолжительности процесса 6 ч.

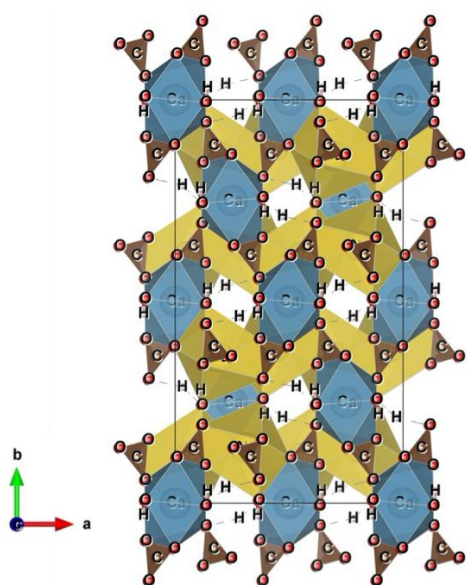


Рисунок 9 – Кристаллическая структура синтетической затравки пирссонита

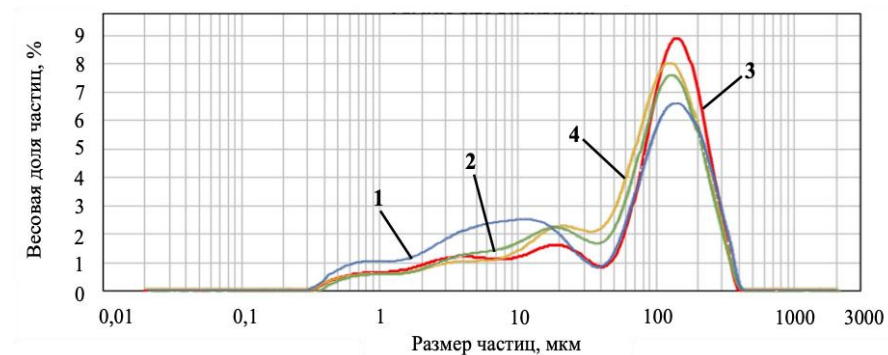


Рисунок 10 – Распределение по крупности частиц в твердых продуктах синтеза пирссонита при дозировке кремнезема 100 масс. % относительно его содержания в нефелиновом шламе и различной продолжительности процесса: 1 – 1 ч.; 2 – 2 ч.; 3 – 4 ч.; 4 – 6 ч.

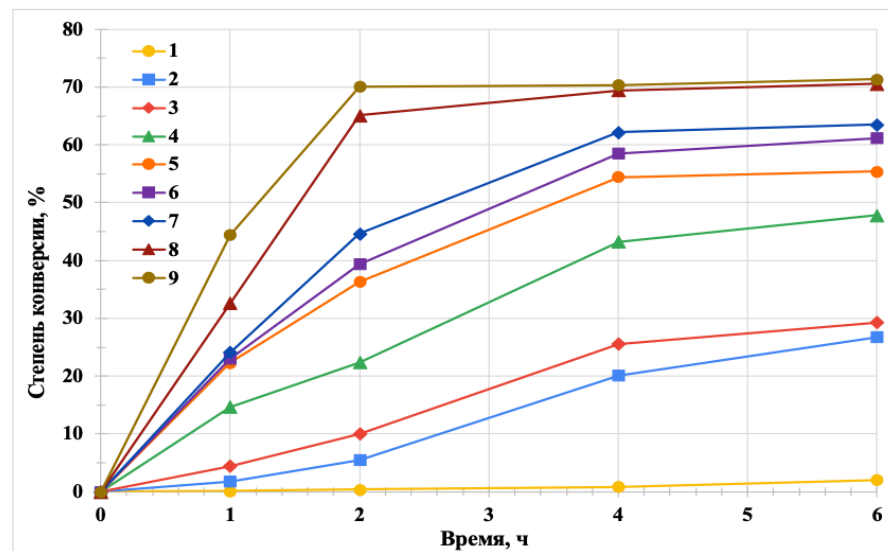


Рисунок 11 – Степень конверсии CaO в пирссонит в зависимости от продолжительности процесса при различной дозировке затравочного материала, % от массы кальцита: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 25; 4 – 50; 5 – 75; 6 – 100; 7 – 125; 8 – 150; 9 – 175