

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и нефтегазового дела им К.Турысова  
Кафедра Химической и биохимической инженерии

Хисамеденова Ирина Сагингалиевна

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Синтез и физико- химические характеристики геополимерных  
композитов на основе отходов ТОО «УПНК-ПВ»

6B07117 Химическая технология нефтегазохимической продукции

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и нефтегазового дела им К.Турысова  
Кафедра Химической и биохимической инженерии



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Синтез и физико- химические характеристики геополимерных композитов на  
основе отходов ТОО «УПНК-ПВ»  
6B07117 Химическая технология нефтегазохимической продукции

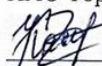
Выполнила

Хисамеденова И.С.

Рецензент

PhD, ассоц. профессор

HAO Торайгыров Университет

 Касанова А.Ж.  
«10» 05 2025г.

Научный руководитель

PhD, ассоц.профессор

 Алиева Г.С.  
«\_\_» \_\_ 2025г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и нефтегазового дела им К.Турысова

Кафедра Химической и биохимической инженерии  
6B07110 Химическая и биохимическая инженерия



**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Хисамеденовой Ирине Сагингалиевне

Тема: «Синтез и физико-химические характеристики геополимерных композитов на основе отходов ТОО «УПНК-ПВ»

Утверждена приказом проректора по академической работе № 26-П от 29 января 2025 г

Срок сдачи законченной работы « \_\_\_\_\_ 20 г.

Исходные данные к дипломной работе: Работа посвящена синтезу геополимерных композитов на основе индустриального сырья и исследованию их свойств

Краткое содержание дипломной работы:

а) Исследование возможности синтеза геополимерных композитов на основе индустриального сырья

б) Исследование свойств геополимерных композитов

в) результаты исследования

Перечень графического материала: представлены слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: включает 20 наименований

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Формулировка цели и задачи	22.01.2025	вполнеено
Обзор литературы	14.02.2025	вполнеено
Материалы и методика исследования	17.03.2025	вполнеено
Обсуждение экспериментальных данных	25.04.2025	вполнеено

**Подписи**

консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу с  
указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Охрана труда	Айткалиева Т.С.	04.06.25	Айткалиева
Норм контролер	Айткалиева Т.С.	04.06.25	Айткалиева

Научный руководитель

Айткалиев  
подпись

Айткалиев  
Ф.И.О.

Задание принял к исполнению обучающийся

Айткалиев  
подпись

Хисамергина И.С.  
Ф.И.О.

Дата

«\_» 20\_\_ г

## АННОТАЦИЯ

Дипломдық жұмыста Павлодар мұнайхимиялық зауытының мұнай коксын кальцинациялау қондырғысында (ЖШС «УПНК-ПВ») пайда болатын қалдықтарды тиімді өндөу мүмкіндігі қарастырылған. Қалдықтардың негізгі түрі — бөлшек өлшемі бірнеше микроннан 8 мм-ге дейінгі кокстық ұнтақ, ол мақсатты өнімнің шығымын төмендетіп, оны жоюға кететін шығындарды арттырады. Баламалы шешім ретінде осы ұнтақты геополимерлі композиттерді синтездеу үшін белсенді компонент ретінде пайдалану ұсынылды.

Жұмыстың аясында щелочты ерітінділерді пайдалана отырып, геополимерлік материалдарды алу үшін зертханалық технология әзірленді. Кремний және гипс құрамды қоспаларды енгізудің физика-химиялық қасиеттерге, оның ішінде беріктік сипаттамаларына, су сіңіруіне, құрылымына және термиялық төзімділігіне әсері зерттелді. Эксперимент нәтижелері кокстық ұнтақтың экологиялық таза құрылыш материалдарын өндіру үшін шикізат ретінде қолданудың перспективтілігін көрсетті.

## АННОТАЦИЯ

В дипломной работе рассматривается возможность эффективной переработки отходов, образующихся при прокалке нефтяного кокса на установке прокалки нефтяного кокса (ТОО «УПНК-ПВ») Павлодарского нефтехимического завода. Одним из основных видов отходов является коксовая мелочь с размером частиц от нескольких микрон до 8 мм, приводящая к снижению выхода целевого продукта и увеличению затрат на утилизацию. В качестве альтернативного решения предложено использование данной мелочи в качестве активного компонента для синтеза геополимерных композитов.

В рамках работы разработана лабораторная технология получения геополимерных материалов с использованием щелочных растворов. Исследовано влияние введения кремний- и гипсосодержащих добавок на физико-химические свойства образцов, включая прочностные характеристики, водопоглощение, структуру и термостойкость. Результаты экспериментов показали перспективность применения коксовой мелочи в качестве сырья для создания экологически безопасных строительных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

## ABSTRACT

This thesis explores the potential for the efficient recycling of waste generated during the calcination of petroleum coke at the petroleum coke calcining unit (LLC «UPNK-PV») of the Pavlodar Petrochemical Plant. One of the main types of waste is coke dust, with particle sizes ranging from a few microns to 8 mm, which leads to reduced yields of the target product and increased disposal costs. As an alternative solution, the use of this dust as an active component for the synthesis of geopolymer composites is proposed.

The work develops a laboratory technology for the production of geopolymer materials using alkaline solutions. The influence of silicon- and gypsum-containing additives on the physicochemical properties of the samples, including strength characteristics, water absorption, structure, and heat resistance, is investigated. The experimental results demonstrate the promising use of coke dust as raw material for creating environmentally safe construction materials with improved performance properties.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Литературный обзор	
1.1 Теоретические основы синтеза геополимерных композитов	11
1.2 Перспективы применения геополимеров в строительстве и промышленности	13
1.3 Физико-химические характеристики геополимерных композитов	14
1.4 Механизм образования геополимерной структуры.	16
2 Экспериментальная часть	
2.1 Сырье для процесса геополимеризации	19
2.2 Методика синтеза геополимера	20
2.3 Изучение физико- химических характеристик геополимеров	21
2.4. Методика определения физико-механических свойств геополимеров	22
3 Результаты и их обсуждение	
3.1 Изучение морфологии геополимеров	23
3.2 Исследование фазового состава геополимеров	26
3.3 Физико-механические свойства геополимерных образцов	28
Заключение	31
Список использованной литературы	32

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие нефтехимической и нефтегазовой отраслей в Казахстане сопровождается увеличением объемов промышленных отходов, что требует поиска эффективных решений для их переработки в рамках концепции устойчивого экологического развития. Рост загрязнения окружающей среды усиливает давление на глобальную экосистему и обостряет необходимость сокращения углеродного следа, особенно в производстве строительных материалов [1].

Одним из перспективных направлений снижения выбросов углекислого газа является переработка промышленных отходов в альтернативные вяжущие материалы, в частности, геополимеры. Геополимерная технология позволяет одновременно решать две важнейшие экологические задачи: уменьшение выбросов парниковых газов и эффективную утилизацию промышленных отходов [2].

В качестве исходных компонентов для синтеза геополимерных вяжущих традиционно применяются побочные продукты промышленности, такие как шлаки, зола-унос и метакаолин [1]. Однако органические вяжущие материалы, часто используемые в теплоизоляционных покрытиях, подвержены старению под действием ультрафиолетового излучения, а неорганические вяжущие требуют высоких температур обработки, что значительно увеличивает их себестоимость [3]. Использование отходов в производстве строительных материалов позволяет не только сократить объем захоронения отходов, но и стабилизировать опасные компоненты, снижая их токсичность и минимизируя воздействие на окружающую среду [4].

Геополимерные материалы, синтезированные с применением промышленных отходов, демонстрируют высокую термостойкость, низкое энергопотребление на этапе производства и отличные теплоизоляционные характеристики, что делает их одними из наиболее перспективных кандидатов для создания экологически чистых строительных решений [3].

Ранее в ходе исследований были разработаны геополимерные композиты на основе кремнийсодержащей добавки (КСД), образующейся при прокалке нефтяного кокса на ТОО «УПНК-ПВ». В рамках настоящего проекта для дальнейшего совершенствования свойств геополимерных материалов предложено использовать гипсодержащий побочный продукт, формирующийся при десульфуризации и очистке дымовых газов после прокалки и сжигания нефтяного кокса. Аналогично применению гипса в производстве портландцемента для замедления процесса схватывания и улучшения водоудерживающей способности цементных смесей, введение гипсодержащего продукта в состав геополимерных композитов позволяет повысить прочность, термостойкость и долговечность материалов.

Целью работы является разработка методов синтеза геополимерных композитов на основе кремнийсодержащей добавки ТОО «УПНК-ПВ» с последующим изучением влияния гипсодержащего побочного продукта,

получаемого в процессе десульфуризации дымовых газов, на физико-химические и эксплуатационные характеристики полученных материалов.

Для достижения цели необходимо решить задачи:

1 Изучение состава и характеристик побочных продуктов процесса прокалки нефтяного кокса на ТОО «УПНК-ПВ»;

2 Разработка методики синтеза геополимерных композитов с варьируемым содержанием гипсодержащего побочного продукта;

3 Оценка физико-химических свойств разработанных геополимерных материалов.

Научная новизна работы заключается в исследовании возможности модификации геополимерных композитов за счёт введения гипсодержащего побочного продукта, что обеспечивает регулирование процессов отверждения, повышение механических характеристик и открывает перспективы создания экологически безопасных строительных материалов на основе отходов нефтехимической промышленности.

Практическая значимость работы заключается в разработке экологически безопасной и экономически эффективной технологии переработки промышленных отходов коксохимического производства в прочные и термостойкие строительные материалы. Использование геополимерных композитов, синтезированных на основе КСД и гипсодержащего продукта, позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и создать новые строительные решения с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Теоретические основы синтеза геополимерных композитов

Геополимеры — это неорганические полимеры с трёхмерной кремний-алюминатной структурой, обладающие высокой ранней прочностью, низкой усадкой, хорошей термостойкостью и устойчивостью к химическому воздействию. Они образуются в результате щелочной активации алюмосиликатных материалов, что приводит к их геополимеризации при высоком рН и температуре до 120 °С [3].

В «сообществе геополимеров» существует группа, которая относит щелочно-активированные алюмосиликаты к геополимерам, но использует при этом неочищенные источники, такие как промышленные отходы. Они считаются третьим поколением цементов после извести и портландцемента. Этот термин был впервые введён и описан Дэвидовичем [5].

Геополимеры относятся к «зелёным» материалам благодаря экологичности и высокой стойкости к внешним воздействиям, что делает их перспективными для строительства [3].

Новые вяжущие материалы с широким спектром применения, разработка которых началась в 1972 году. Это время, когда начались активные исследования и работы в области создания новых вяжущих материалов с использованием алюмосиликатных соединений.

1930-е годы — в этот период начались исследования реакции каолинита с едким натром, что стало основой для дальнейшего развития концепции геополимеров.

1976 год — основные принципы алюмосиликатных геополимеров были сформулированы. Это важный момент в теории геополимеров, когда было установлено, что геополимеры могут быть получены через щелочную активацию алюмосиликатных материалов.

1977–1978 годы — в эти годы были идентифицированы полисиалатные блоки-полимеры, а также был изучен метакаолин, получаемый путём прокаливания каолина при 750 °С. Метакаолин является одним из важнейших сырьевых материалов для создания геополимеров [6].

Виктор Глуховский был одним из первых исследователей, кто изучал щелочную активацию алюмосиликатов. В 1950-х годах он выдвинул гипотезу о том, что процесс щелочной активации аналогичен естественному формированию цеолитов. Эта идея послужила основой для дальнейших исследований в области геополимеров.

1980-е годы — в этот период российские ученые действительно сделали значительный вклад в изучение процессов схватывания и отвердения щелочно-активированного шлакового цемента. Это было время, когда начались более глубокие исследования свойств и применения геополимеров на базе промышленных отходов, таких как шлаки [3].

Промышленные отходы содержат примеси, вызывающие микроструктурные неоднородности. Композиты на основе таких материалов обладают разнообразными механическими свойствами из-за вариативности

состава золы-уноса и присутствия фаз вяжущих веществ таких как кальциевый алюмосиликат гидрат (Ca-A-S-H), калиевый алюмосиликат гидрат (K-A-S-H) или натриевый алюмосиликат гидрат (N-A-S-H), подобно тем, которые встречаются в цементах.

Главное отличие щелочно-активированных цементов от геополимеров заключается в том, что первые — это гидратированные кристаллические осадки, тогда как геополимеры представляют собой аморфные наноструктуры, не содержащие химически связанной воды, за исключением воды, удерживаемой водородными связями [5].

Геополимеры обладают рядом уникальных свойств (быстрый набор прочности, химическая и термостойкость, стабильность, нетоксичность, экологичность и др.), это делает их перспективным материалом будущего. Основные процессы их получения включают:

а) Геополимеризация — процесс, направленный на утилизацию твердых отходов и побочных продуктов.

б) Щелочная активация, при которой стекловидное вещество частично или полностью преобразуется в искусственный каменный материал.

История строительства знает немало примеров повторного открытия технологий, известных еще в древности и переосмысленных в индустриальную эпоху.

Давидович наблюдал аморфные и полукристаллические трехмерные силико-алюминатные структуры. Он также классифицировал структуру геополимеров на основе соотношения Si/Al, как показано на рисунке 1. Цепные структуры  $[SiO_4]^{4-}$ -тетраэдров с катионами и нейтрализующими анионами формируют минеральный полимерный каркас для достижения прочности. Эти силикатные минералы, обладающие OH-группами, обладают отличными свойствами формирования горных пород [7].

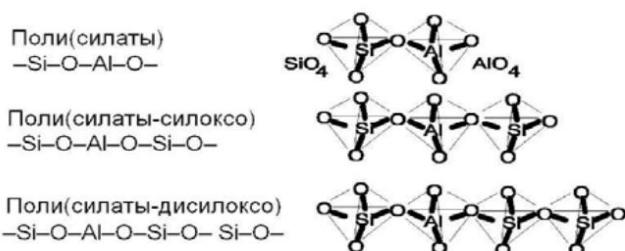


Рисунок 1 – Структурная схема геополимеров

Геополимеры классифицируются в зависимости от последовательности расположения атомов кремния и алюминия, формируя группы полисилатов, полисилато-силоксов и полисилато-дисилоксов. Их структурная основа представлена тетраэдрическими ячейками, где центральное положение занимают атомы кремния и алюминия, соединённые с четырьмя атомами кислорода. Эти элементы способны образовывать сложные пространственные каркасы с развитой трёхмерной структурой.

## 1.2 Перспективы применения geopolимеров в строительстве и промышленности

Технология применения geopolимеров играет важную роль в снижении выбросов  $\text{CO}_2$ , что делает их перспективным экологически чистым строительным материалом. Первые исследования влияния geopolимерных материалов на окружающую среду проводились еще в 1990 году в Пенсильванском университете, где изучали потенциал глобального потепления [ПГП] при сравнении выбросов  $\text{CO}_2$  в процессе производства портландцемента и geopolимерного цемента. Установлено, что производство 1 тонны портландцемента сопровождается выбросами от 0,85 до 1,0 тонны  $\text{CO}_2$ , что делает его одним из основных источников загрязнения атмосферы.

В отличие от традиционного цемента, изготовление geopolимеров не требует обжига при высоких температурах, что существенно снижает углеродный след. Однако высокая стоимость geopolимерных бетонов пока остается сдерживающим фактором их широкого внедрения. Несмотря на это, geopolимерные материалы можно рассматривать как инновационную альтернативу, обеспечивающую рациональное использование природных ресурсов, переработку промышленных отходов и сокращение выбросов  $\text{CO}_2$ , что делает их перспективными для устойчивого строительства [6].

Рост отходов и истощение ресурсов требуют перехода к «зеленым» материалам, сокращающим потребление сырья и перерабатывающим промышленные побочные продукты [8]

Geopolимерные материалы находят широкое применение в строительстве, особенно в качестве теплоизоляционных и конструкционных элементов, благодаря их экологичности. В отличие от традиционного портландцемента, производства которого сопровождается значительными выбросами  $\text{CO}_2$ , geopolимеры получают из вторичных ресурсов, таких как зола-унос и металлургические шлаки. Их синтез не требует высокотемпературного обжига известняка, что существенно снижает углеродный след.

Благодаря высокой прочности, термостойкости и химической инертности geopolимеры могут служить альтернативой традиционным цементным материалам, обеспечивая устойчивость к агрессивным средам при сниженной экологической нагрузке [3].

В условиях глобального потепления возрастает потребность в эффективных теплоизоляционных материалах, особенно в строительстве. Традиционно вяжущим компонентом бетона является портландцемент, однако его устойчивость к высоким температурам ограничена. Поэтому актуальна разработка альтернативных вяжущих веществ, способных выдерживать термическое воздействие.

Geopolимерные технологии становятся всё более востребованными благодаря их экономичности и перспективности в создании огнеупорных составов и жаростойких материалов. В отличие от органических фасадных покрытий, geopolимерные составы обладают высокой стойкостью к

ультрафиолету и старению, что делает их оптимальными для внешней отделки зданий [3].

Применение геополимеров:

1. Матрицы для армированных композитов.
2. Различные огнеупорные материалы.
3. Коррозионностойкие покрытия.
4. Прекурсоры для керамики. [5]

Благодаря специфике технологии и химического состава, геополимерные материалы имеют высокий потенциал для дальнейшего совершенствования и широкого практического применения в различных сферах [9].

### **1.3 Физико-химические характеристики геополимерных композитов**

Одним из ключевых этапов в разработке эффективных геополимерных материалов является механическая активация сырья, которая представляет собой процесс воздействия на твёрдые вещества с использованием механической энергии посредством интенсивного измельчения, деформации и столкновения частиц. В результате данных механических воздействий в материале происходят значительные физико-химические преобразования, направленные на повышение его реакционной способности как в объеме, так и на поверхности. Это обусловлено увеличением числа активных центров, нарушением координационных связей, накоплением внутренней энергии, а также вероятным формированием аморфных фаз. При этом химический состав вещества остаётся прежним, однако материал приобретает более высокую готовность к химическим взаимодействиям [10].

Следующим важным этапом в формировании свойств геополимеров является геополимеризация, эффективность которой определяется химико-минералогическим составом исходного сырья. Ключевыми параметрами, влияющими на скорость и полноту синтеза, являются: концентрация щелочного активатора, соотношение кремний- и алюмосодержащих компонентов, pH среды, содержание воды и тип применяемого активатора [11]. Например, окись кальция (CaO) играет важную роль в формировании структуры композита, способствуя росту механической прочности. Однако её избыток может вызывать вспучивание и нарушение целостности структуры. Присутствующие в шлаке ионы кальция активизируют растворение алюмосиликатных фаз, ускоряя образование геополимерного геля. Механические свойства геополимеров, получаемых на основе вторичных ресурсов (зола-унос, красный шлам, зола рисовой шелухи и др.), существенно зависят от параметров системы: гранулометрического состава, степени щелочности, соотношения компонентов и возможных побочных реакций в ходе синтеза. [12].

Для дополнительного контроля над структурными характеристиками и улучшения эксплуатационных свойств геополимеров в состав вводятся органические модифицирующие компоненты, основная задача которых — снижение пористости, формирование более плотной структуры, а также

улучшение сцепления между компонентами смеси. Эти добавки рассчитываются пропорционально массе щелочного компонента. Благодаря улучшению когезионных свойств смеси, обеспечивается более равномерное распределение наполнителя внутри геополимерного матрикса и повышение его взаимодействия с вяжущей фазой, что способствует формированию плотной и прочной структуры. Комплексное воздействие механической активации, подбора сырья и применения модификаторов формирует уникальные физико-химические свойства геополимерных материалов, среди которых особо важны термостойкость и механическая прочность [13].

Одним из эффективных способов повышения прочностных характеристик геополимеров является армирование их структуры волокнистыми наполнителями. Особенно перспективным считается использование неорганических волокон, таких как углеродные, базальтовые и стеклянные. Эти материалы обеспечивают улучшение механической прочности, жёсткости и устойчивости геополимерных матриц к растрескиванию [3].

Преимущества геополимеров:

1. Использование дешевых отходов для их производства (например, шлака, золы-уноса, различных глин, а также сельскохозяйственных отходов).
2. Снижение выбросов СО<sub>2</sub> в атмосферу в процессе производства.
3. Производство при комнатной температуре.
4. Высокая прочность на сжатие и изгиб, особенно по сравнению с цементами [5].

Термостойкость и температурное поведение геополимерных матриц. Геополимерные композиты отличаются высокой прочностью, отличной адгезией к различным поверхностям, долговечностью, термостойкостью и устойчивостью к агрессивным средам. Исследования показывают, что данные материалы способны сохранять стабильные характеристики при температурных воздействиях до 1200–1400 °С, что открывает широкие перспективы их применения в условиях экстремального теплового воздействия [3].

Механические и термические свойства геополимерных матриц. Дополнительные исследования подтверждают, что геополимеры, как неорганические полимерные материалы, обладают выраженной термостойкостью. Их термическое поведение, включая температуры плавления и фазовых переходов, напрямую зависит от минерального и химического состава исходного алюмосиликатного сырья, а также от природы применяемого щелочного активатора.

Химическая стойкость и устойчивость в агрессивных средах. Геополимерное связующее в таких системах выполняет не только связующую, но и защитную функцию, эффективно экранируя армирующие волокна от воздействия высоких температур и агрессивных сред. Особенно это актуально для углеродных волокон, склонных к разрушению при окислении. Таким образом, геополимерные композиты с волокнистым армированием рассматриваются как высокоперспективные материалы для эксплуатации в условиях экстремальных температур и химически агрессивных сред.

## 1.4 Механизм образования geopolимерной структуры

Согласно Давидовицу, geopolимеризация представляет собой сложную химическую реакцию, в которой алюмосиликатные прекурсоры взаимодействуют со щелочными полисиликатами, формируя полимерные связи Si–O–Al. Для обозначения алюмосиликатных структур в этих минералах принято использовать запись  $(\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$  вместо  $(2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ , что подчёркивает четырёхкоординационное состояние алюминия. Процесс отверждения geopolимеров, согласно его теории, включает реакцию поликонденсации, в ходе которой алюмосиликатные соединения образуют прочный пространственный каркас с преобладанием Si–O–Al связей, что схематически представлено на рисунке.

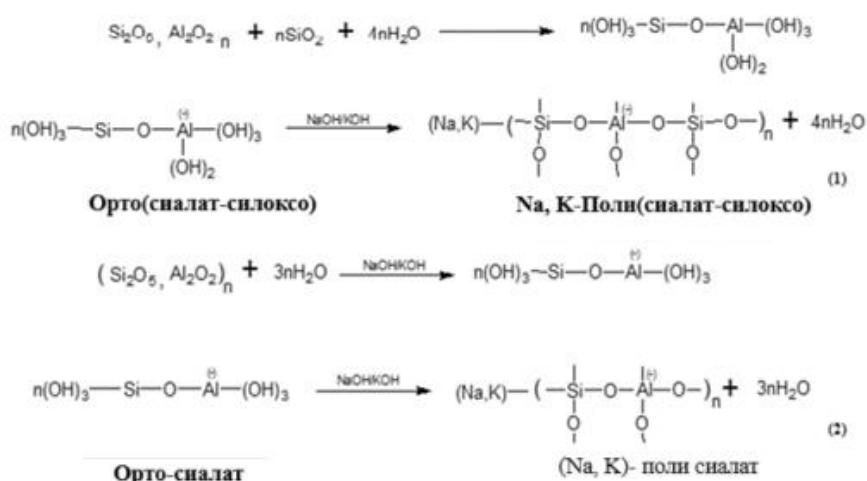


Рисунок 2 – Механизм реакции для geopolимеризации

В процессе схватывания geopolимеров протекает реакция поликонденсации, в результате которой формируются аморфные и полукристаллические алюмосиликатные структуры. Этот механизм приводит к образованию прочного пространственного каркаса, обеспечивающего высокие эксплуатационные свойства материала [7].

Химия механизма geopolимеризации включает следующие этапы:

Щелочная активация – это процесс, при котором щелочной активатор инициирует растворение алюмосиликатных компонентов исходного сырья. Щелочной активатор разрушает связи Si–O–Si в алюмосиликатном сырье, что приводит к высвобождению ионов кремния (Si) и алюминия (Al) в раствор. После разрушения структуры атомы Al внедряются в место разрушенных связей Si–O–Si, формируя новый структурный блок Si–O–Al. Это изменяет химическую структуру и готовит материал к geopolимеризации.

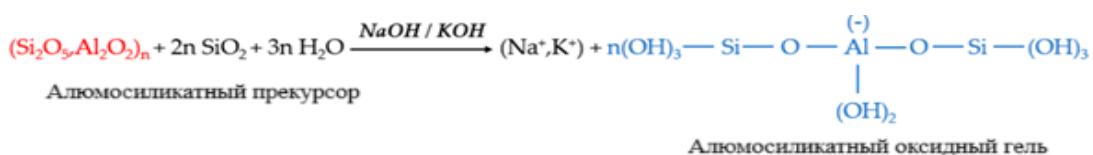


Рисунок 3 – Образование алюмосиликатного оксидного геля

Полученные растворённые компоненты образуют алюмосиликатные гели, которые являются основой для дальнейшей поликонденсации. Поликонденсация – это процесс соединения этих гелей в прочную сетчатую структуру геополимера. Таким образом, щелочная активация играет ключевую роль в формировании структуры геополимера, влияя на его механические и физико-химические свойства.

Алюмосиликатный гелевый фазовый продукт проявляет высокую реакционную способность в щелочной среде, инициируя интенсивные химические взаимодействия. В результате формируется жесткая трехмерная пространственная решетка, в которой атомы кремния (Si) и алюминия (Al) координируются через кислород (O), создавая прочную сеть связей Si-O-Al. Для завершения процесса геополимеризации и обеспечения материалу необходимых механических характеристик требуется термическое воздействие в интервале температур 25–90 °C. В ходе поликонденсации высвобождается вода, однако значительная ее часть рекомбинируется в процессе растворения исходных компонентов.

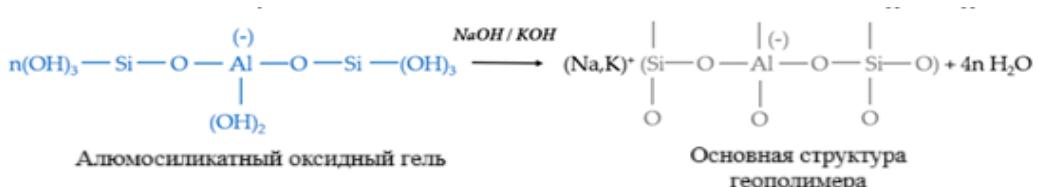


Рисунок 4 – Формирование структуры геополимера

Архитектура пор геополимеров формируется под влиянием нескольких факторов: размера частиц исходного сырья, скорости геополимеризации, типа растворителя, соотношения компонентов и условий отверждения.

В геополимерных материалах встречаются три типа пор:

1. Макропоры (>50 нм) – самые крупные, обладают хорошей взаимосвязью между собой.
2. Мезопоры (2–50 нм) – промежуточные, располагаются между различными фазами геополимера.
3. Микропоры (<2 мкм) – самые мелкие, формируют пористую структуру внутри геля.

Причины образования пор в геополимерной матрице:

1. Воздушные пузыри, остающиеся в материале при реакциях растворения и поликонденсации.
2. Испарение воды после сушки, оставляющее пустоты.
3. Неполное реагирование частиц сырья, в результате чего между ними остаются промежутки.

Повышенная концентрация щелочного активатора интенсифицирует растворение алюмосиликатного сырья, что благоприятствует процессу геополимеризации. Это способствует формированию более упорядоченной и плотной структуры материала, а также улучшает когезионные свойства между

геополимерной матрицей и минеральными наполнителями, что в свою очередь повышает прочностные показатели бетона. Тем не менее, избыточное содержание щелочного раствора может оказывать негативное воздействие на механические и микроструктурные характеристики. Чрезмерная концентрация NaOH провоцирует избыточно ускоренное разложение исходного сырья, что дестабилизирует поликонденсационные процессы.

Избыток гидроксид-ионов ( $\text{OH}^-$ ) приводит к преждевременному осаждению геополимерного геля, что ухудшает прочностные характеристики полученного материала. Следовательно, для обеспечения оптимальных эксплуатационных свойств необходимо тщательно регулировать концентрацию щелочного активатора [14].

Синтез геополимеров требует двух основных компонентов: реактивного твёрдого материала, содержащего активные соединения кремния и алюминия, и щелочного раствора, включающего гидроксиды щелочного металла, силикаты или их комбинацию.

Щелочные катионы, такие как натрий  $[\text{Na}^+]$  и калий  $[\text{K}^+]$ , играют важную роль в формировании геополимерной структуры. Они уравновешивают отрицательный заряд алюминатных тетраэдров и способствуют созданию прочной трёхмерной сети. Щелочные растворы с гидроксидом натрия (NaOH) в качестве активного компонента являются предпочтительными для геополимеризации. Важным фактором при формировании геополимерной матрицы является температура отверждения, так как она оказывает влияние на свойства конечного продукта. При высоких температурах отверждение может привести к неэффективным результатам, поэтому для промышленного производства оптимально использовать отверждение при обычной температуре [9].

## 2 Экспериментальная часть

### 2.1 Сырье для процесса геополимеризации

Синтез геополимеров осуществляется путем тщательного смешивания компонентов до получения однородной массы. Чтобы минимизировать количество воздуха в смеси, используют вакуум, вибрацию или другие методы. Это способствует улучшению микроструктуры и повышению механических свойств материала. Процесс геополимеризации основан на щелочной активации алюмосиликатных компонентов, в результате которой образуется трёхмерная пространственная структура с высокой прочностью и термостойкостью. На первом этапе оксиды алюминия и кремния растворяются в щелочной среде с образованием активных комплексов, которые затем вступают в реакцию поликонденсации. Образуется гелеобразная фаза, переходящая в прочный аморфный материал с характерной связью Si–O–Al.

В качестве основного алюмосиликатного сырья использовалась кремнийсодержащая добавка (КСД), представляющая собой светло-серый сыпучий порошок. Добавка характеризуется массовой долей влаги не более 3,5% и содержит примерно 20,06% кремния. Она практически нерастворима в воде, что указывает на преобладание аморфных фаз и остаточных нерастворимых компонентов, включая зольные и шлаковые соединения.



Рисунок 5 – Кремнийсодержащая добавка

Вторым компонентом выступала гипсосодержащая добавка (ГСД), включающая в основном сульфат кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и побочные продукты нейтрализации. Массовая доля двуводного сульфата кальция в составе добавки составляет не менее 70%. Внешне она представляет собой порошкообразный материал бело-серого оттенка (рисунок 6).



Рисунок 6 – Гипсосодержащая добавка

Перед использованием все твёрдые компоненты подвергались предварительной сушке при температуре 105 °C до постоянной массы. После этого они измельчались до фракции менее 75 мкм для повышения реакционной способности и однородности получаемой смеси.

В качестве щелочного активатора применялся раствор силиката натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) с концентрацией 8 моль/л, который приготавливается путём растворения 9,76 грамма  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  в 100 миллилитрах дистиллированной воды. Раствор стабилизировался при комнатной температуре не менее 24 часов перед использованием.

## 2.2 Методика получения геополимера

Щелочной раствор готовился заранее путём растворения  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  в дистиллированной воде с доведением до концентрации 8 М. Раствору давали стабилизироваться в течение 24 ч при комнатной температуре перед использованием.

Для каждого образца сухие компоненты (КСД и ГСД) в заданном соотношении (100/0 до 50/50) тщательно перемешивались в течение 5 мин, после чего к ним постепенно добавлялся щелочной активатор. Смешивание проводилось при помощи механического миксера (400 об/мин) в течение 15 мин до получения однородной пастообразной массы.

Полученные смеси заливались в специальные формы, уплотнялись вручную. Первичное отверждение осуществлялось при комнатной температуре в течение 24 ч для завершения геополимеризации. После этого все образцы стабилизировались при 25 °C в течение 7 суток перед испытаниями.

Были приготовлены смеси кремниесодержащих и гипсосодержащих добавок в различных массовых соотношениях (рисунок 4):

- 100% КСД / 0% ГСД
- 90% КСД / 10% ГСД
- 80% КСД / 20% ГСД
- 70% КСД / 30% ГСД
- 60% КСД / 40% ГСД
- 50% КСД / 50% ГСД

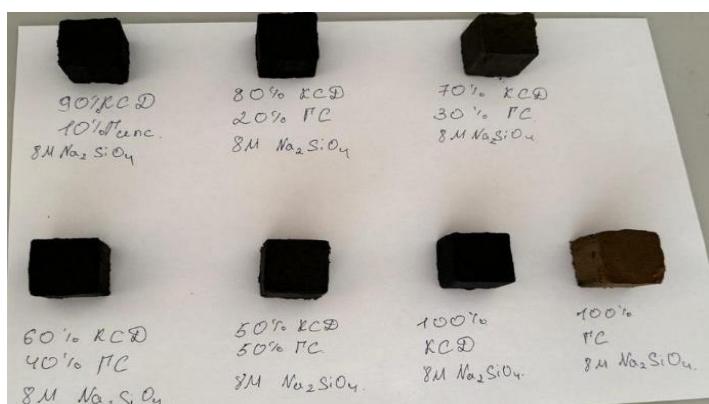


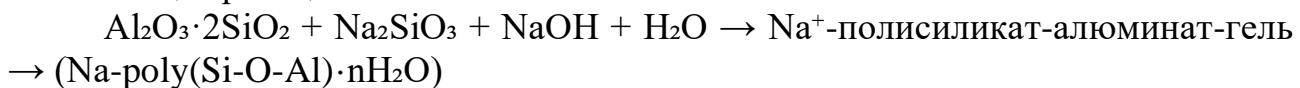
Рисунок 7 – Полученные геополимеры

Процесс геополимеризации включает в себя следующие стадии:

1. Растворение алюмосиликатов под действием щелочной среды. В данном случае щелочная среда создаётся за счёт применения 8-молярного раствора метасиликата натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), который выполняет двойную функцию: обеспечивает высокое значение pH (выше 12), необходимое для растворения кремний- и алюмосодержащих компонентов, а также сам поставляет ионы Si для построения геополимерной сетки.

2. Перераспределение и образование олигомеров Si-O-Al.
3. Поликонденсация с образованием пространственной сетки.

Общая реакция:



Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) может взаимодействовать с щелочной средой, изменяя структуру, способствуя образованию дополнительных фаз, таких как CSH (кальций-силикат-гидрат), усиливая прочностные характеристики.

### 2.3 Изучение физико-химических характеристик геополимеров

Для определения элементного и фазового состава использовались методы рентгенофазного анализа (XRD), инфракрасной спектроскопии Фурье (FTIR) и рентгеновской спектроскопии. Полученные результаты подтвердили наличие ключевых элементов — кремния, алюминия и кальция — а также определили основные кристаллические и аморфные фазы, присутствующие в образцах.

Термическая устойчивость материалов была охарактеризована с применением методов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА). Эти методы позволили выявить температурные интервалы термической стабильности, а также определить основные процессы дегидратации, декомпозиции и фазовых переходов.

Для оценки текстурных характеристик исходного сырья и геополимеров использовался метод БЭТ, что позволило измерить удельную поверхность и пористость. Установлено, что структура пор и степень развитости поверхности существенно влияли на реологические свойства смесей и на прочностные характеристики отверждённых образцов.

Изменения в химической структуре геополимеров в процессе синтеза отслеживались с помощью ИК-спектроскопии, что позволило определить формирование новых химических связей, характерных для геополимерных гелей. Прочностные характеристики образцов после термообработки до 800 °C оценивались по остаточной прочности на сжатие и трещиностойкости. Также были проведены испытания на водопоглощение и капиллярную влажность, в результате которых установлено, что добавка гипса снижает влагостойкость, но способствует более раннему формированию твёрдой структуры. По результатам ДСК и ТГА были определены ключевые температурные точки, такие как температура стеклования (Tg), а также зафиксированы эндотермические и экзотермические процессы, связанные с изменениями фазового состава.

## 2.4 Методика определения физико-механических свойств геополимеров

Для оценки эксплуатационных характеристик полученных геополимерных образцов были выбраны три ключевых параметра: прочность на сжатие, остаточная прочность после термообработки и водопоглощение. Эти показатели позволяют всесторонне оценить устойчивость, структурную надёжность и пористость материала.

Прочность на сжатие является одним из основополагающих показателей, отражающих несущую способность материала. Определение проводилось в соответствии с международным стандартом ASTM C109/C109M, регламентирующим методику испытаний цементных и подобных композитов. Испытания выполнялись на кубических образцах размерами  $20 \times 20 \times 20$  мм<sup>3</sup>, прошедших отверждение при комнатной температуре в течение 7 суток. Для нанесения нагрузки использовалась универсальная испытательная машина с максимальной нагрузкой до 100 кН. Скорость нагружения составляла 0,5 кН/с. Для повышения достоверности результатов каждое значение усреднялось по результатам испытаний не менее трёх образцов одного состава.

Остаточная прочность после термообработки оценивалась с целью определения термостойкости геополимерных композитов. Образцы подвергались нагреву до температуры 800 °C в муфельной печи с контролируемой скоростью подъёма температуры — 10 °C/мин. При достижении заданной температуры выдержка составляла 2 часа, после чего образцы охлаждались на воздухе до комнатной температуры. Далее они испытывались на сжатие по той же методике, что и до термообработки, с последующим сопоставлением полученных значений для определения остаточной прочности.

Водопоглощение использовалось как косвенный показатель пористости и плотности структуры. Метод основан на измерении увеличения массы образцов после выдержки в воде. Предварительно образцы высушивались при температуре 105 °C до постоянной массы, после чего погружались в воду на 24 часа при комнатной температуре. По завершении выдержки образцы извлекались, обтирались салфеткой до удаления капельной влаги и взвешивались повторно.

### 3 Результаты и их обсуждение

#### 3.1 Изучение морфологии геополимеров

Важной составляющей исследования физико-химических характеристик геополимерных композитов стало изучение их морфологии. Основная цель морфологического анализа заключалась в выявлении структурных изменений, возникающих при варьировании содержания гипса в составе, а также в определении степени геополимеризации, плотности геополимерной матрицы и уровня пористости материала.

Для оценки влияния минерального состава техногенных отходов на формирование структуры геополимеров были получены морфологические снимки образцов, содержащих по 100% КСД (рисунок 8) и ГСД (рисунок 9). Проведение СЭМ-анализа позволило визуализировать особенности микроструктуры, определить степень плотности, наличие аморфной матрицы, остаточных частиц и пористости.

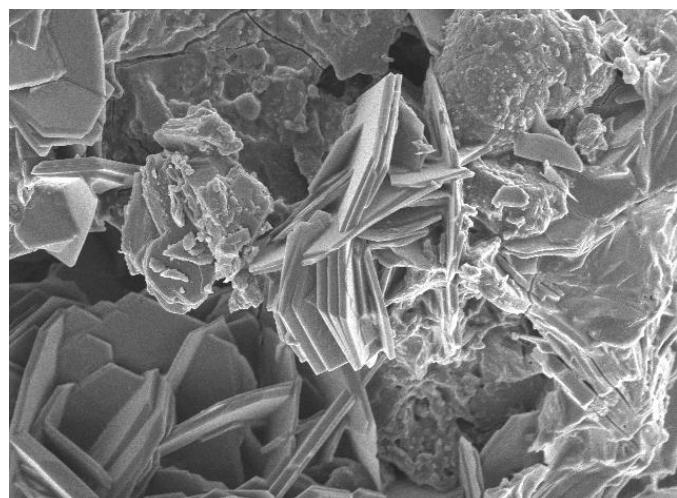


Рисунок 8 – Микрофотография геополимера, содержащего 100% КСД

На СЭМ-изображении геополимера, полностью сформированного с использованием КСД (рисунок 8) в качестве алюмосиликатного источника, наблюдается выраженная гетерогенность микроструктуры. Поверхность образца содержит как компактные, так и пористые участки, что свидетельствует о неоднородности протекания процессов щелочной активации.

Характерные гладкие или волокнистые области указывают на формирование аморфной геополимерной матрицы, предположительно натрий-алюмосиликатного состава (N-A-S-H), которая частично покрывает исходные минеральные частицы. Отдельные угловатые включения с чёткими границами можно интерпретировать как недоактивированные остатки КСД, содержащие углеродистые и нерастворимые минеральные компоненты. В целом, общая морфология указывает на то, что при использовании 100% КСД образуется прочная, но неоднородная по плотности геополимерная структура, требующая оптимизации условий щелочной активации для повышения степени вовлечения сырья в реакцию.

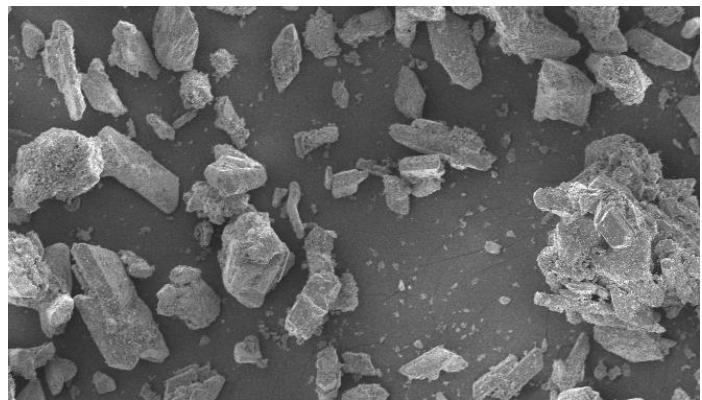
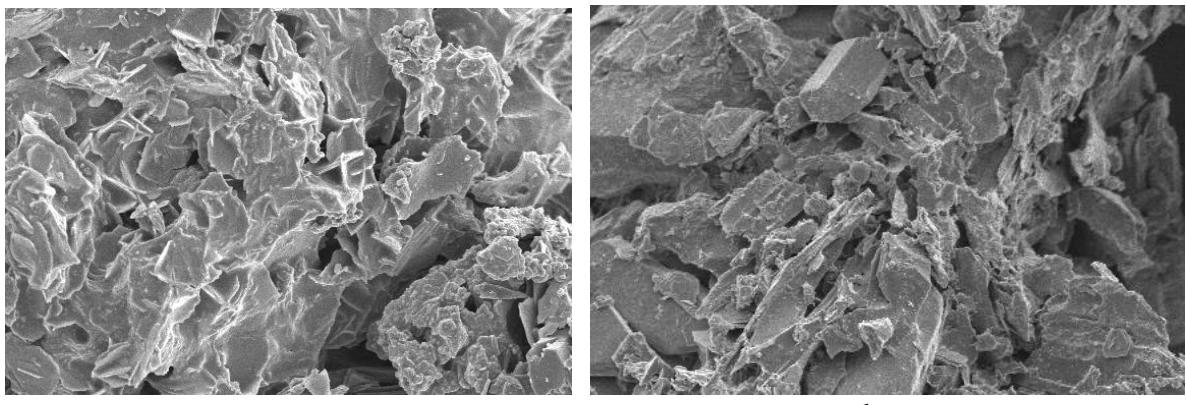


Рисунок 9 – Микрофотография геополимера, содержащего 100% ГСД

При анализе микроструктуры геополимера на основе 100% ГСД (рисунок 9) визуально отмечается не только неоднородность, но и признаки слабой аггломерации между частицами. Поверхность структуры местами выглядит рыхлой, слабо связанными фрагментами, что может свидетельствовать о недостаточной поликонденсации гелеобразных фаз. Это, вероятно, связано с особенностями минерального состава ГСД, в том числе с преобладанием кальцийсодержащих соединений и недостаточной концентрацией реакционноспособных алюмосиликатов. В совокупности это ограничивает образование прочной и плотной геополимерной матрицы, снижая эффективность связывания компонентов.

Морфологические исследования с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) продемонстрировали существенное влияние содержания гипсодержащей добавки (ГСД) на структуру геополимерных композитов (рисунок 10).



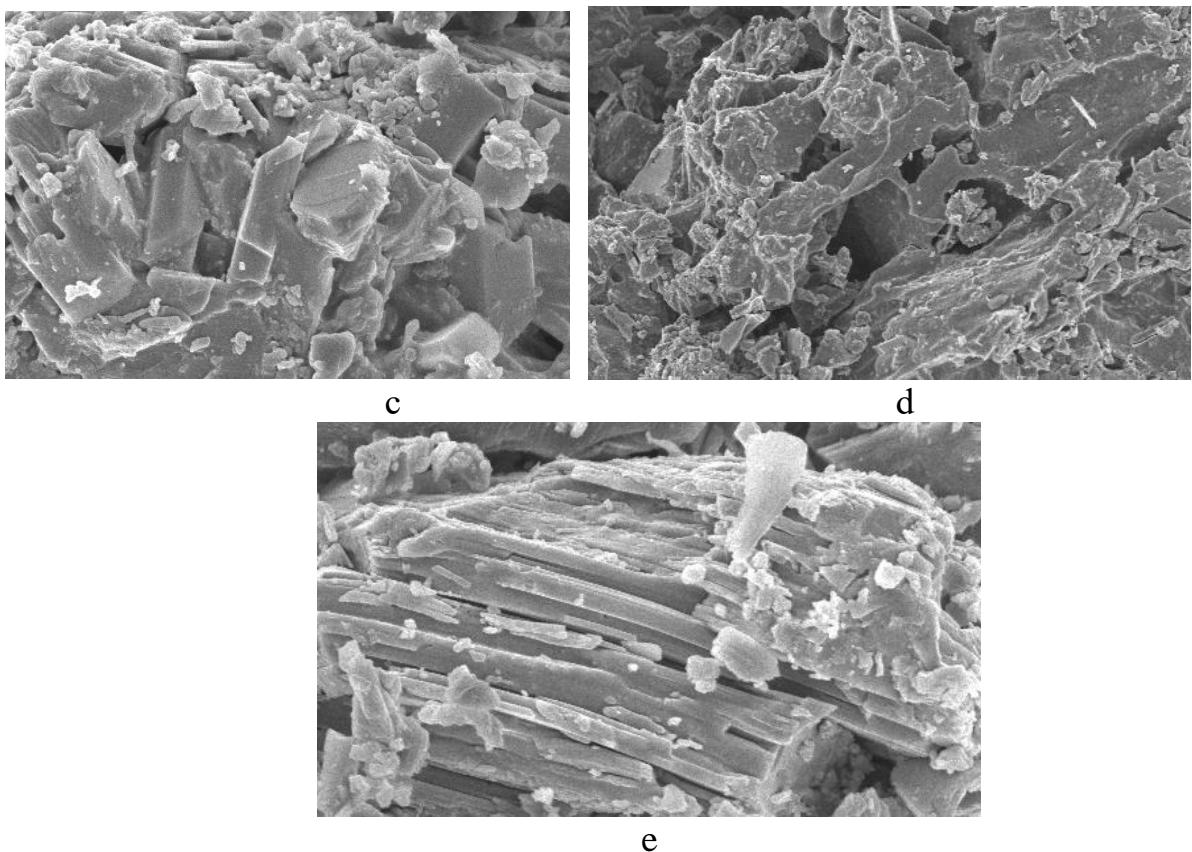


Рисунок 10 – СЭМ-изображение образца с соотношением КСД и ГСД 90/10 (а), 80/20 (б), 70/30 (с), 60/40 (д), 50/50 (е)

На рисунках 10 отмечается, что при мере увеличения доли ГСД в системе наблюдаются отчётливые изменения в морфологии geopolимерной матрицы. На изображениях (а) и (б) структура сохраняет черты, характерные для КСД-основанных образцов — с преобладанием плотных участков и выраженных зерен, частично окружённых аморфной матрицей. Однако уже на стадии 20–30% ГСД (изображения б и с) появляются зоны с более рыхлой и слабо агломерированной текстурой, что указывает на снижение плотности и усиление пористости.

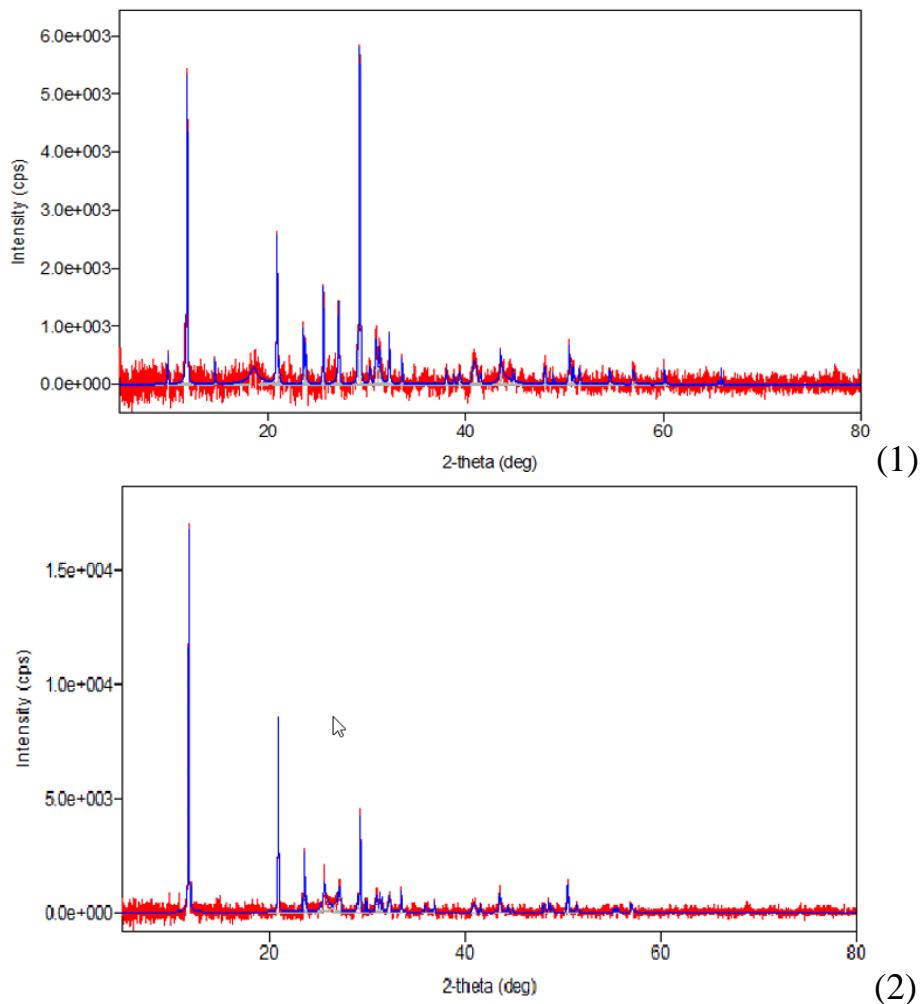
При дальнейшем увеличении доли ГСД до 40–50% (д и е) становится очевидным формирование неоднородной, слабо сцепленной структуры, с признаками недостаточной geopolимеризации. Поверхность характеризуется нарушением непрерывности матрицы и фрагментированными участками, что может быть связано с преобладанием кальцийсодержащих фаз и снижением концентрации активного алюмосиликатного компонента.

Таким образом, введение ГСД оказывает значительное влияние на морфологические характеристики: при низких концентрациях возможно структурное уплотнение за счёт дополнительного связывания, тогда как при превышении критического порога (~30–40%) наблюдается ухудшение агломерации и снижение качества geopolимерной матрицы. Эти наблюдения подчёркивают важность оптимизации состава для достижения желаемого баланса между плотностью, прочностью и реакционной способностью.

### 3.2 Исследование фазового состава geopolимеров

Для оценки процессов структурообразования в geopolимерных композитах использовался рентгенофазовый анализ (РФА), позволяющий выявить степень кристалличности, наличие аморфной матрицы и особенности фазовых превращений при варьировании состава системы. Полученные рентгенограммы отражают влияние соотношения коксовой шламообразной добавки (КСД) и гипсодержащей добавки (ГСД) на формирование пространственной структуры в материале.

В образце, содержащем 100% КСД (6 кривая), на рентгенограмме наблюдается размытая и мало выраженная дифракционная картина, что может свидетельствовать о частичном растворении компонентов, но при этом — ограниченной степени geopolимеризации. Это подтверждается и морфологическим анализом, по которому структура представлена рыхло сцеплёнными фрагментами, с неравномерной аггломерацией. Отсутствие чёткой аморфной фазы и слабое развитие гелеобразной матрицы указывают на недостаточную реакционную способность КСД как единственного сырьевого компонента.



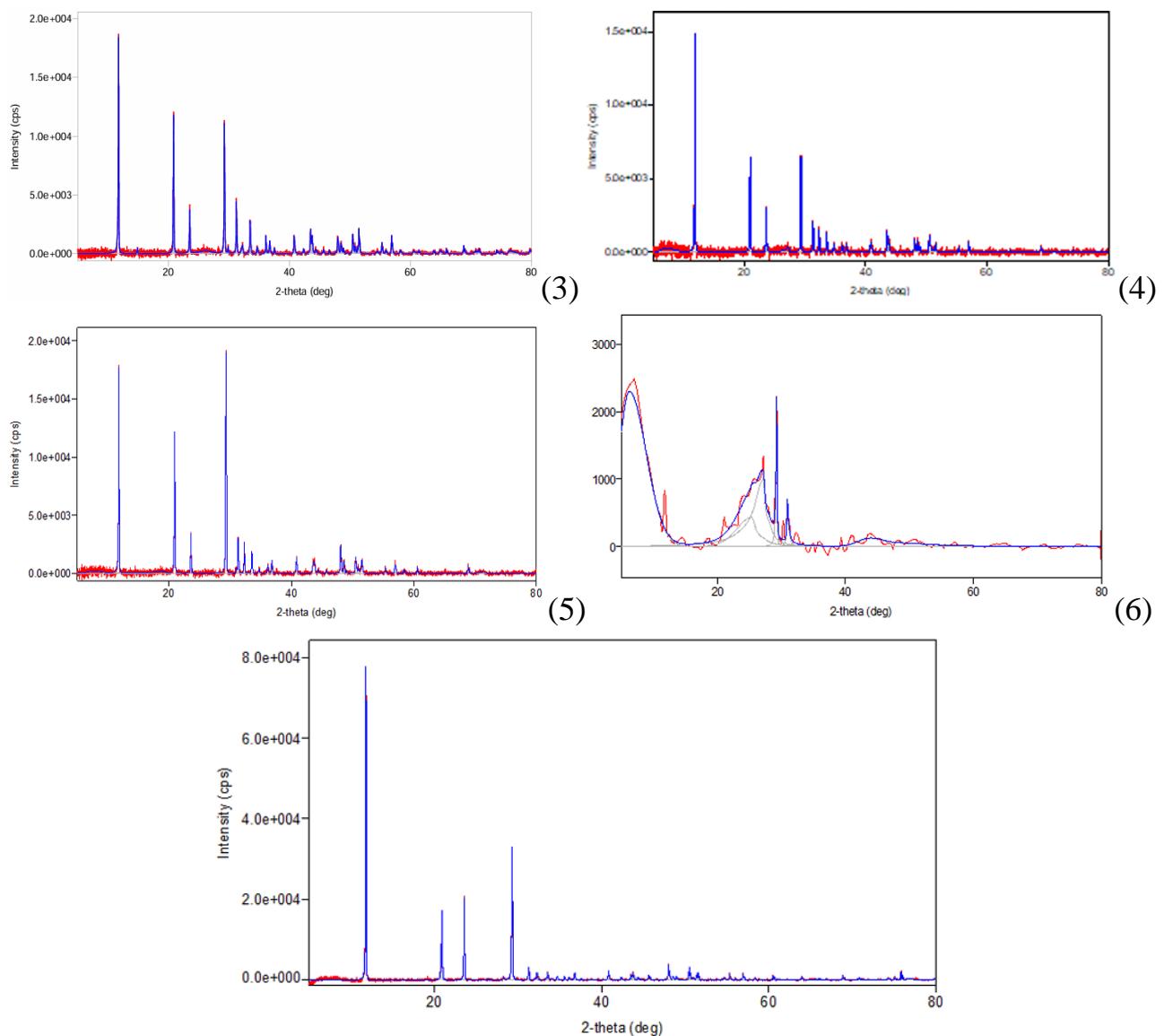


Рисунок 11 – Рентгенофазовый анализ образцов геополимеров, содержащих КСД и ГСД соответственно 90/10 (1), 80/20 (2), 70/30 (3), 60/40 (4), 50/50(5), 100% КСД (6), 100% ГСД (7)

Гипсосодержащая добавка (7 кривая) содержит значительное количество растворимых сульфатных и кальциевых соединений, в первую очередь  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (гипс), которые при взаимодействии с щелочной средой высвобождают ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Эти ионы способны участвовать в образовании кальцийсодержащих гелей типа С-А-С-Н, а также стабилизировать структуру алюмосиликатной матрицы за счёт взаимодействия с Al и Si. Подобный механизм подробно описан в работе [15], где установлено, что фосфогипс, будучи аналогом ГСД, активирует процессы формирования плотной микроструктуры, способствует образованию аморфной и частично кристаллизованной фазы, а также улучшает сцепление между микрочастицами геополимерной матрицы. Согласно авторам, при введении фосфогипса в зольный геополимер наблюдалось увеличение содержания аморфной фазы и структурное уплотнение, что сопровождалось повышением прочности.

Аналогично, в настоящем исследовании введение ГСД в систему, основанную на КСД, сопровождалось существенными изменениями в рентгенофазовой картине: на фоне усиления дифракционных максимумов фиксируется увеличение аморфной составляющей и выравнивание микроструктуры.

Особый интерес представляют образцы с соотношением КСД: ГСД 90:10 и 80:20. Согласно результатам SEM, именно при этих дозировках наблюдается наиболее благоприятная морфология: структура характеризуется умеренной пористостью, плотной агломерацией частиц и равномерным распределением фаз. По сравнению с исходным 100% КСД-образцом, где отмечалась рыхлая и фрагментированная структура, введение небольшого количества ГСД привело к улучшению связности матрицы и формированию более устойчивой геополимерной сетки.

Рентгенофазовый анализ данных образцов подтверждает структурные изменения: усиливается фоновая аморфная составляющая, фиксируются признаки формирования новых фаз, что может свидетельствовать о развитии С-A-S-H структур на фоне N-A-S-H матрицы. Это указывает на то, что введение ГСД в малых количествах активирует процессы поликонденсации и стабилизирует структуру, не подавляя при этом развитие аморфной геополимерной фазы.

Таким образом, результаты СЭМ и РФА, полученные в ходе настоящего исследования, позволяют заключить, что оптимальные структурные характеристики достигаются при введении ГСД в количестве 10–20% от массы минеральной части. Это подтверждает целесообразность совместного использования КСД и ГСД для получения геополимеров с улучшенными структурными параметрами.

### **3.3 Физико-механические свойства геополимерных образцов**

Физико-механические характеристики геополимерных композитов являются ключевыми показателями, определяющими их пригодность для строительных и теплоизоляционных применений. В рамках данного исследования основное внимание было уделено прочности на сжатие, остаточной прочности после термообработки при 800 °C, а также водопоглощению композитов с различным соотношением кремнийсодержащих (КСД) и гипсодержащих добавок (ГСД).

Полученные результаты (таблица 1) демонстрируют чёткую зависимость прочностных характеристик от содержания гипса в составе. В отличие от ряда литературных данных, где избыток кальцийсодержащих фаз может снижать прочность, в настоящем исследовании увеличение доли ГСД способствовало формированию более прочной геополимерной матрицы. Особенно выраженный рост прочности наблюдается при переходе от 70/30 к 50/50, где достигаются максимальные значения как первоначальной, так и остаточной прочности. Это может быть связано с образованием дополнительных прочностных фаз, таких как CSH-гидраты, а также с улучшенной компактностью структуры при участии гипса.

Таблица 1 – Влияние ГСД на физико- механические свойства геополимеров

Соотношение КСД/ГСД (%)	Прочность на сжатие, МПа	Остаточная прочность после 800°C, МПа	Водопоглощение, %
100/0	13.2	7.5	6.1
90/10	17.8	13.4	6.8
80/20	21.3	17.9	7.4
70/30	24.7	21.2	8.1
60/40	28.1	24.3	8.7
50/50	30.5	26.1	9.3

По результатам таблицы 1 заметно, что с ростом содержания ГСД от 0 до 50 % прочность на сжатие возрастила. Образцы, содержащие 100 % кремниесодержащей добавки (КСД), демонстрировали сравнительно низкие значения прочности, что обусловлено слабой агрегацией и частичной геополимеризацией алюмосиликатной фазы. При добавлении 10–20 % гипса прочность увеличивалась до 18–22 МПа, а наибольшая прочность была зафиксирована при содержании ГСД 40–50 %, достигнув 28–30 МПа. Это связано с тем, что сульфат кальция, содержащийся в ГСД, способствует формированию дополнительных соединений (в частности, С–S–Н фаз), усиливающих структуру геополимерной матрицы.

Остаточная прочность после термообработки при 800 °С также демонстрировала положительную корреляцию с увеличением доли ГСД. Наиболее термостойкие образцы (40–50 % ГСД) сохраняли до 80–85 % исходной прочности, тогда как у образцов на основе только КСД наблюдалось разрушение структуры и потеря более 40 % прочностных свойств. Это указывает на стабилизирующее влияние гипса при термонагрузках, вероятно, за счёт образования устойчивых соединений и плотной структуры.

Водопоглощение демонстрировало умеренный рост с увеличением содержания ГСД: от 6–7 % у чистых КСД-материалов до 9–10 % у композитов с 50 % гипса. Несмотря на увеличение пористости, структурная плотность и механическая прочность улучшались, что объясняется эффективным взаимодействием компонентов в щелочной среде и образованием прочной сетчатой матрицы.

Образование алюмосиликатной связи в геополимерах изучалось методом ИК-Фурье спектроскопии (рисунок 12).

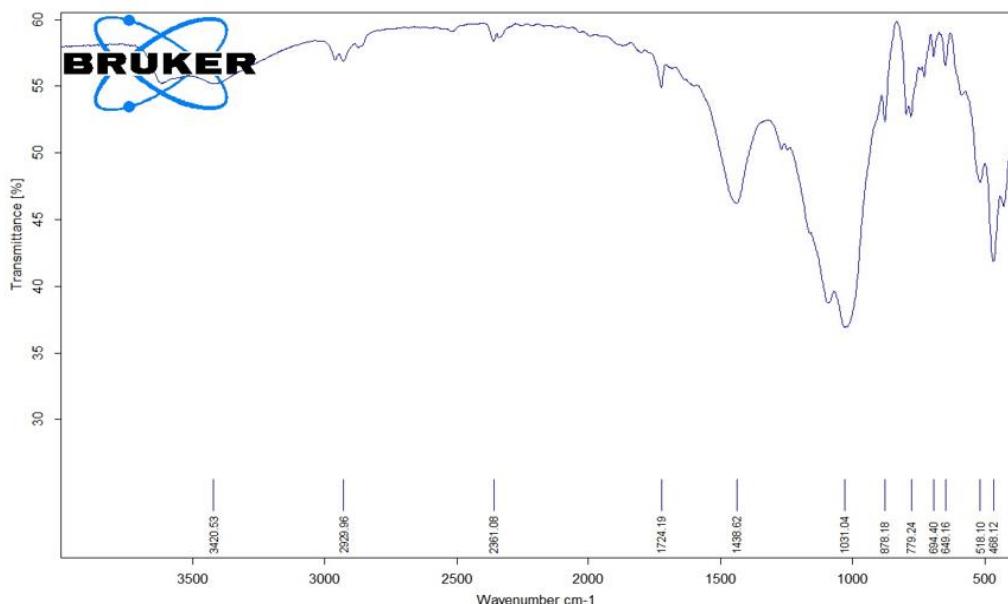


Рисунок 12 - ИК-спектр образца геополимера КСД и ГСД 80% /20%

В ИК-спектре образцов геополимеров наблюдается интенсивный пик при  $\sim 1031$  см $^{-1}$ , что, по мнению авторов [16, 17], является характерным признаком геополимеризации. Авторы работы связывают данную полосу поглощения для силикатной структуры с колебанием связи Si-O/Al-O алюмосиликатного каркаса, что отражает образование аморфного алюмосиликатного геля в бинарных системах [18]. Пики в области 518 см $^{-1}$  подтверждают наличие функциональных групп Si-O-T (T: тетраэдрический Al или Si). Авторы [19] связывают это с образованием полос, обусловленных внутренними колебаниями связей SiO-Si и Si-O-Al, происходящими в тетраэдрах или алюминий- и кремний-кислородных молекулярных структурах.

Таким образом, добавление гипсодержащей добавки способствует не только повышению прочности геополимеров, но и улучшению их термостойкости за счёт комплексного влияния на фазовый состав и микроструктуру

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геополимеры представляют собой экологически чистую альтернативу традиционному портландцементу и могут быть получены из сырья, содержащего силикаты и алюминаты в аморфной фазе. Важными факторами, влияющими на процесс геополимеризации, являются размер частиц и химический состав исходного материала. Неполные реакции и побочные процессы могут снизить качество конечного продукта. Использование тонкоизмельчённого сырья позволяет получать геополимеры с хорошей прочностью и пластичностью.

На основе экспериментальных данных установлено, что увеличение содержания гипсодержащей добавки (ГСД) способствует повышению прочности геополимеров как в исходном состоянии, так и после термообработки. Образцы с содержанием ГСД 30–50% показали наилучшие значения прочности на сжатие, а также сохраняли структурную целостность после нагрева до 800 °С, что свидетельствует о формировании термостойкой матрицы. Одновременно наблюдалось снижение водопоглощения при увеличении доли ГСД, что указывает на более плотную структуру полученных композитов.

Полученные данные согласуются с результатами более ранних исследований, подтверждающих положительное влияние кальцийсодержащих фаз на уплотнение структуры и улучшение термостойкости геополимеров. Использование комбинации КСД и ГСД в оптимальных пропорциях позволяет достичь баланса между реакционной способностью, прочностью и водостойкостью.

Использование местных материалов с высоким содержанием аморфных силикатов и алюминатов, а также различных щелочных активаторов, открывает возможности для создания экологически чистых геополимерных композитов, что является перспективным направлением для дальнейших исследований и разработок в этой области [12].

Доступность сырья, производительность процесса и последние результаты синтеза способствуют внедрению геополимерного процесса для разработки новых экологически чистых строительных материалов. Поэтому жизненно важно изучить механические свойства, химические характеристики и финансовую выгоду/экологичность различных полимерных цементов, изготовленных с использованием промышленных отходов/побочных продуктов, чтобы понять пробелы в исследованиях [20].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krishna, r s & ur Rehman, Asif & Mishra, Jyotirmoy & Saha, Suman & Korniejenko, Kinga & Rehman, Rashid & Salamci, Metin & Sglavo, Vincenzo & Shaikh, Faiz & Qureshi, Tanvir. (2024). Additive manufacturing of geopolymers composites for sustainable construction: critical factors, advancements, challenges, and future directions. *Progress in additive manufacturing*. 10. 1003-1061. 10.1007/s40964-024-00703-z
2. Synthesis of geopolymers spheres with photocatalytic activity Patricia Isabel Bravo, Roy Alvin Malenab, Eiza Shimizu, Derrick Ethelbert Yu And Michael Angelo Promentilla *Matec web conf.*, 268 (2019) 04007  
Doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926804007>
3. Processing and properties of geopolymers as thermal insulating materials: a review Emy Aizat Azimi1 , Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah 1,2 , Liew Yun Ming 1 , Heah Cheng Yong 1 , Kamarudin Hussin 1,2 and Ikmal Hakem Aziz 1
4. Potential of using industrial wastes for production of geopolymers binder as green construction material.
5. Provided for non-commercial research and educational use. Not for reproduction, distribution or commercial use.
6. Строительство и архитектура doi: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-8-23  
1кабирова А.И.,2, Ибрагимов Р.А. 1бетонные Заводы «Элкон»
7. Burduhos Nergis, D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., & Tahir, m. F. M. (2018). Geopolymers and their uses: review. *Iop conference series: materials science and engineering*, 374, 012019. Doi:10.1088/1757-899x/374/1/012019
8. Р. З. Рахимов, н. Р. Рахимова, о. В. Стоянов геополимеры
9. Строительство и архитектура doi: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-22  
кожухова н.и
10. Кабирова а. И., Ибрагимов р. А. Геополимеры, полученные механоактивацией исходных компонентов: обзор текущих тенденций // вестник белгородского государственного технологического университета им. В.г. Шухова. 2024. №. 5. С. 8-23. Doi: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-5-8-23>
11. Falikman v.r. Geopolymeric binders and concrete in modern construction / v.r. Falikman, k.yu. Okhotnikova // international research journal. — 2015.
12. Review on development of geopolymers composites from aluminosilicate materials Vishnu P Anirudhan1 , Aravind Unnithan
13. Соттикулов Элёр Сотимбоевич, and Соатов Сирожиддин Уролович. "Получение нового органо-гибридного геополимера и изучение влияния органических добавок" *Universum: технические науки*, no. 12-4 (81), 2020, pp. 68-71.
14. Sambucci, Matteo & Sibai, Abbas & Valente, m.. (2021). Recent advances in geopolymers technology. A potential eco-friendly solution in the construction materials industry: a review. *Journal of composites science*. 5. 109. 10.3390/jcs5040109.

15. Jandhyala, J., Rao, H., Ghorpade, V. XRD & SEM studies of Fly-ash and Phosphogypsum based Geopolymer Bricks // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2021. – Vol. 69. – P. 225–232. – DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I6P232
16. ARIÖZ E., ARIÖZ O., METE KOCKAR O. An experimental study on the mechanical and microstructural properties of geopolymers. *Procedia Engineering*, 42, 100, 2012.
17. CHINDAPRASIRT P, RATTANASAK U, JATURAPITAKKUL C. Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustion in geopolymeric materials. *Cement Concrete Comp.*, 33, 55, 2011.
18. FINOCCHIARO C., BARONE G., MAZZOLENI P., LEONELLI C., GHARZOUNI A., ROSSIGNOL S. FTIR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (Mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions. *Construction and Building Materials*, 262, 2020.
19. OLVIANAS M., WIDIYATMOKO A., PETRUS H. IRSpectral Similarity Studies of Geothermal SilicaBentonite Based Geopolymer. In: AIP Conference Proceedings, 1887, 2017.
20. Azad, Numanuddin & Samarakoon, Samindi. (2021). Utilization of industrial by-products/waste to manufacture geopolymer cement/concrete. *Sustainability*. 13. 873. 10.3390/su13020873.

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу  
Хисамединовой Ирины

6B07117-Химическая технология нефтезагохимической продукции  
на тему: Синтез и физико-химические характеристики геополимерных  
композитов на основе отходов ТОО «УПНК ПВ»

Дипломная работа посвящена актуальной научно-практической задаче разработки альтернативных вяжущих материалов — геополимеров — с использованием техногенного сырья. Актуальность темы обусловлена необходимостью внедрения экологически безопасных технологий в строительной индустрии, а также рационального использования промышленных отходов.

Работа отличается логичной структурой, включает обзор литературы, описание методик, экспериментальные исследования и анализ полученных результатов. Теоретическая часть содержит обзор современного состояния исследований в области геополимерных материалов, освещает основные механизмы геополимеризации, особенности щелочной активации и роль кальций- и алюмосиликатсодержащих добавок.

В экспериментальной части автор провела обоснованный подбор состава исходного сырья, чётко описала методику получения геополимерных композитов с варьированием соотношения КСД и ГСД. Применены современные методы физико-химического анализа — сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, вместе с тем изучены физико-механические характеристики образцов (прочность, термостойкость, водопоглощение). Представленные результаты системно интерпретированы, выявлены оптимальные условия получения композитов с высокой прочностью и термостойкостью.

Установлено, что добавление 10–30 % гипсодержащего компонента способствует формированию более плотной структуры и росту прочности геополимеров, о чём свидетельствуют результаты ТГА и СЭМ-исследований.

Замечания к работе носят незначительный характер и касаются преимущественно редакционных аспектов (единичные стилистические повторы, форматирование некоторых рисунков). В целом, работа выполнена на высоком научно-методическом уровне, соответствует направлению обучения и рекомендуется к защите, а ее автор заслуживает положительной оценки.

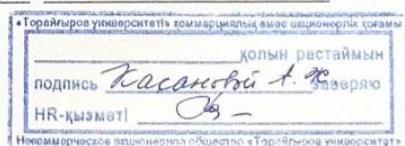
Рецензент  
Доктор PhD, ассоциированный  
профессор (доцент)  
НАО Торайгыров Университет



Касанова А.Ж.

«30» Мая 2025 г.

Ф КазНИТУ 706-17. Рецензия



**ОТЗЫВ**

**НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломную работу

**Хисамеденовой Ирины Сагингалиевны**

6B07117 Химическая технология нефтегазохимической продукции

Тема: Синтез и физико-химические характеристики геополимерных композитов на основе отходов ТОО «УПНК-ПВ»

Дипломная работа Хисамеденовой И. посвящена актуальной теме разработки экологически безопасных строительных материалов на основе геополимеров. В условиях перехода к «зелёной» экономике особую значимость приобретает использование промышленных отходов в качестве сырья, что отражено в данной работе.

Автором проведён подробный анализ научной литературы, выявлены современные подходы к синтезу геополимерных композитов. В практической части работы разработана методика синтеза геополимеров с использованием различных добавок (КСД и ГСД), изучено их влияние на морфологические и прочностные характеристики полученных материалов. Особое внимание удалено инструментальным методам анализа — ИК-спектроскопии, ТГА и СЭМ, которые позволили глубоко исследовать процессы структурообразования и фазовых превращений в системе.

Работа отличается логичной структурой, научной обоснованностью и самостоятельностью автора. Результаты изложены чётко, сопровождаются наглядными иллюстрациями и таблицами. Автор продемонстрировала высокий уровень владения экспериментальными методами и навыками интерпретации данных.

На основании вышеизложенного считаю, что работа Хисамеденовой И. заслуживает оценки 95 «отлично», а её автор — присвоения степени бакалавра.

**Научный руководитель**

Ассоц. профессор, PhD

Айткалиева Г.С.

« 4 » *Марк* 2025 г.





## Similarity Report

### Metadata

Name of the organization

**Satbayev University**

Title

**Синтез и физико химические характеристики геополимерных композитов на основе отходов**

Author(s) Coordinator

**Хисамеденова ИГульзат Айткалиева**

Organizational unit

**ИГИНГД**

### Record of similarities

SCs indicate the percentage of the number of words found in other texts compared to the total number of words in the analysed document. Please note that high coefficient values do not automatically mean plagiarism. The report must be analyzed by an authorized person.



**25**  
The phrase length for the SC 2



**5416**  
Length in words



**46315**  
Length in characters

### Alerts

In this section, you can find information regarding text modifications that may aim at temper with the analysis results. Invisible to the person evaluating the content of the document on a printout or in a file, they influence the phrases compared during text analysis (by causing intended misspellings) to conceal borrowings as well as to falsify values in the Similarity Report. It should be assessed whether the modifications are intentional or not.

Characters from another alphabet		0
Spreads		0
Micro spaces		1
Hidden characters		0
Paraphrases (SmartMarks)		2

### Active lists of similarities

This list of sources below contains sources from various databases. The color of the text indicates in which source it was found. These sources and Similarity Coefficient values do not reflect direct plagiarism. It is necessary to open each source, analyze the content and correctness of the source crediting.

The 10 longest fragments			Color of the text
NO	TITLE OR SOURCE URL (DATABASE)	NUMBER OF IDENTICAL WORDS (FRAGMENTS)	
1	Синтез и исследование геополимерных композитов на основе индустриального сырья 6/7/2024 Satbayev University (ИГИНГД)	22 0.41 %	
from RefBooks database (0.00 %)			
NO	TITLE	NUMBER OF IDENTICAL WORDS (FRAGMENTS)	
from the home database (0.41 %)			

NO	TITLE	NUMBER OF IDENTICAL WORDS (FRAGMENTS)
1	Синтез и исследование геополимерных композитов на основе индустриального сырья 6/7/2024 Satbayev University (ИГиНГД)	22 (1) 0.41 %

from the Database Exchange Program (0.00 %) █

NO	TITLE	NUMBER OF IDENTICAL WORDS (FRAGMENTS)
	from the Internet (0.00 %) <span style="color: green;">█</span>	

**List of accepted fragments** (no accepted fragments)

---

NO	CONTENTS	NUMBER OF IDENTICAL WORDS (FRAGMENTS)