

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова

Кафедра «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»

Кажмуратов Айдын Рустемович

«Исследование физико-химических свойств новых материалов, полученных  
из техногенных отходов»

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Образовательная программа  
6B07109 – Инженерная физика и материаловедение

Алматы 2025

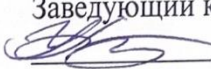
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова

Кафедра «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой «МНиИФ»  
 Какимов У. К.  
«02» 06 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование физико-химических свойств новых материалов,  
полученных из техногенных отходов»

По специальности 6В07109 - «Инженерная физика и материаловедение»

Выполнил:

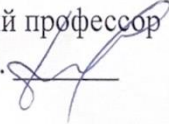
Кажмуратов А.Р.

Рецензент:

к.ф.-м.н., профессор  
зав. лаб. ЛФИЯП,  
Дмитриева Е. А.



Научный руководитель:

к. ф.-м. наук,  
ассоциированный профессор  
Бейсебаева А. С. 

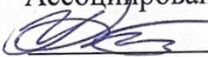
Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова  
Кафедра «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»  
6B07109 – Инженерная физика и материаловедение

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой «МНиИФ»  
Кандидат технических наук,  
Ассоциированный профессор  
 Какимов У. К.

«02» 06 2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

**На выполнения дипломной работы**

Обучающемуся Кажмуратов Айдын Рустемовичу

Тема: Исследование физико-химических свойств новых материалов,  
полученных из техногенных отходов

Утверждена приказом ректора университета №26-П/О № от 23.04.2025 г.

Срок сдачи законченной работы «05» 06 2025.

Исходные данные к дипломной работе: для исследования физико-химических  
свойств новых материалов из техногенных отходов, был синтезирован цеолит  
типа Na-X из золы уноса, полученного с Павлодарского ТЭЦ-3.

Краткое содержание дипломной работы: Работа посвящена исследованию  
физико-химических свойств синтезированного цеолита из золы уноса

а) Литературный обзор

б) Экспериментальная часть

Рекомендуемая основная литература: 1 Tarmale B. G., Lokhande R. S., Naik S. R.  
Zeolite from blended coal fly ash: synthesis, characterization and application in  
industrial waste water treatment // International Journal of Chemical and Physical  
Sciences. – 2015. – Vol. 4. – P. 21–30.



**ГРАФИК**  
Подготовки дипломной работы

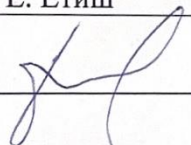
| Наименование разделов, Перечень разрабатываемых вопросов | Сроки предоставления научному руководителю | Примечания |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------|
| Литературный обзор                                       | 01. 02. 2025                               |            |
| Основная часть                                           | 01. 03. 2025                               |            |
| Экспериментальная часть                                  | 01. 04. 2025                               |            |

**ПОДПИСИ**

Консультанта и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

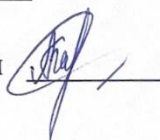
| Наименование разделов | Консультанты И. О. Ф. (уч. степень, звание)                           | Дата подписания | Подпись                                                                               |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Нормоконтролер        | Магистр технических наук, преподаватель кафедры «МНиИФ»<br>Т. Е. Етиш | 02. 06. 2025    |  |

Научный руководитель



Бейсебаева А. С.

Задание принял к исполнению обучающийся



Кажмуратов А.

Дата

«02» 06 2025 г.

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Кажмуратов Айдын Рустемович

6B07109 – Инженерная физика и материаловедение

Тема: «Исследование физико-химических свойств новых материалов, полученных из техногенных отходов»

Дипломная работа студента посвящена синтезу цеолита из золы уноса и исследованию их физико-химических свойств. Дипломная работа состоит из двух основных разделов и заключения. В первом разделе автор представил подробный литературный обзор, посвященный экологическим проблемам, связанным с накоплением золы уноса. Особое внимание уделено цеолитам, их структуре, свойствам, а также методам синтеза. Автор грамотно обосновал актуальность своей темы, подчеркнув значимость утилизации техногенных отходов.

Во втором разделе изложена экспериментальная часть. Подробно описан процесс подготовки золы уноса, включая этапы кальцинации, кислотной и щелочной обработки, а также гидротермального старения. Применены современные методы исследования материалов: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгенофазовый анализ (XRD), энергодисперсионный анализ (EDS). На основании результатов было выявлено, что образец золы уноса, полученный из Павлодарского ТЭЦ-3 является хорошим сырьем для синтеза цеолита. Так же на основании морфологических признаков и дифрактограмм установлено формирование цеолитной фазы типа Na-X. Автор корректно сопоставил полученные данные с литературными источниками и эталонными базами.

Дипломная работа Кажмуратова А. Р. выполнена на высоком научно-методическом уровне, демонстрирует владение экспериментальными методиками и аналитическим мышлением. Работа имеет прикладное значение и может быть использована при разработке экологически безопасных технологий утилизации золошлаковых отходов. В целом дипломная работа Кажмуратова А. Р. оценивается на «отлично» - 90% и ее автор заслуживает присвоения академической степени бакалавра техники и технологии по образовательной программе 6B07109 – Инженерная физика и материаловедение.

Научный руководитель  
к. ф-м. н., ассоц. профессор



Бейсебаева А. С.

Дата: 02.06.2025 г.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кажмуратов Айдын Рустемович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Исследование физико-химических свойств новых материалов, полученных из техногенных отходов

**Научный руководитель:** Бейсебаева А.С.

**Коэффициент Подобия 1:** 0,5

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 4

**Знаки из других алфавитов:** 5

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

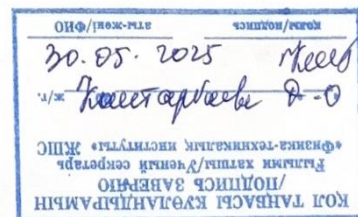
26.05.2025



Заведующий кафедрой

Какимов У.К.





## АНДАТПА

Бұл жұмыста Павлодар қаласындағы ЖЭО-3-тен алынған ұшпа күл негізінде Na–X типті цеолитті синтездеу қарастырылады.

Синтезге дейін ұшпа күлдің морфологиялық және химиялық қасиеттері сканерлейтін электрондық микроскопия (СЭМ) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (ЭДС) әдістері арқылы зерттелді. Цеолит сілтілік өңдеу және кейінгі гидротермиялық қартаю әдісімен алынды. Алынған материал рентгенфазалық талдау (XRD) және СЭМ көмегімен зерттелді. Зерттеу нәтижелері бойынша үлгіде Na–X типті цеолит фазасы түзілгені анықталды. Бұл алынған дифракциялық пиктердің эталондық мәндермен сәйкес келуі және морфологиялық құрылымымен расталады.

Жұмыста ұшпа күлді қайталама шикізат ретінде қолданып, экологиялық және технологиялық мақсатта қолайлы цеолиттік материал алуға болатыны көрсетілді.



## АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается синтез цеолита типа Na–X на основе золы уноса, полученной с Павлодарской ТЭЦ-3.

Перед проведением синтеза были изучены морфологические и химические свойства золы уноса методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного анализа (ЭДС). Сам цеолит синтезирован методом щелочной активации с последующим гидротермальным старением. Готовый материал был исследован с помощью рентгенофазового анализа (XRD) и СЭМ. По результатам анализа установлено, что в образце сформировалась цеолитная фаза типа Na–X. Это подтверждается совпадением дифракционных пиков с эталонными значениями и характерной пористой морфологией.

Работа демонстрирует возможность утилизации золы уноса как вторичного ресурса для получения функциональных цеолитных материалов, применимых в экологических и технологических целях.

## **ABSTRACT**

This thesis presents the synthesis of Na–X type zeolite using fly ash collected from the Pavlodar CHPP-3 in Kazakhstan.

Prior to synthesis, the morphological and chemical characteristics of the fly ash were studied using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The zeolite was synthesized via alkaline activation followed by hydrothermal aging. The resulting material was analyzed by X-ray diffraction (XRD) and SEM. The results confirmed the formation of the Na–X zeolite phase, as evidenced by the characteristic diffraction peaks and porous morphology.

This study demonstrates the potential for utilizing fly ash as a secondary raw material to produce functional zeolite materials suitable for environmental and technological applications.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ                                                                      | 9  |
| 1 Литературный обзор                                                          | 10 |
| 1.1 Вопросы экологической безопасности золы уноса и перспективы её утилизации | 10 |
| 1.2 Зола уноса: состав и структурные особенности                              | 12 |
| 1.3 Влияние параметров сгорания на свойства золы                              | 12 |
| 1.4 Химический состав золы уноса                                              | 14 |
| 1.5 Цеолиты                                                                   | 14 |
| 1.6 Классификация и происхождение природных и синтетических цеолитов          | 15 |
| 1.7 Строение структуры цеолита                                                | 15 |
| 1.8 Преимущества синтетических цеолитов и особенности их синтеза              | 17 |
| 2 Экспериментальная часть                                                     | 19 |
| 2.1 Исходные материалы и реагенты, использованные для синтеза цеолита         | 19 |
| 2.2 Синтез цеолита                                                            | 19 |
| 2.3 Изучение физико-химических свойств золы уноса                             | 28 |
| 2.4 Изучение физико-химических свойств цеолита                                | 31 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ                                                                    | 34 |
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ                                                           | 35 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ                                                | 36 |
| Приложения                                                                    | 38 |



## ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность, особенно энергетика, сопровождается образованием большого количества техногенных отходов, одним из которых является зола уноса — твёрдый остаток, образующийся при сжигании угля на тепловых электростанциях. Несмотря на то, что зола уноса в значительных объёмах захоранивается на золоотвалах, она обладает высоким содержанием кремнезёма и алюмосиликатных соединений, что делает её потенциально ценным вторичным сырьём.

Одним из направлений переработки таких отходов является получение цеолитов — кристаллических алюмосиликатов с развитой пористой структурой, которые находят широкое применение в качестве адсорбентов, ионообменных материалов и катализаторов. Особый интерес представляет цеолит типа Na-X (фауяситовая структура), обладающий высокой сорбционной способностью и открытой микропористой системой. В мировой практике он применяется для очистки сточных вод, осушения газов и разделения различных веществ на молекулярном уровне.

Синтез цеолитов из золы уноса позволяет не только создавать ценные материалы, но и решать важную экологическую задачу — утилизацию отходов угольной энергетики. Это особенно актуально для Казахстана, где значительная часть электроэнергии вырабатывается за счёт сжигания угля, а зола уноса в большинстве случаев не перерабатывается.

В данной работе в качестве сырья использовалась зола уноса, отобранная с Павлодарской ТЭЦ-3. Основной целью исследования стало получение цеолита Na-X с использованием щелочной активации и гидротермального старения, а также изучение его морфологических и фазовых свойств. Для подтверждения состава и структуры были применены методы рентгенофазового анализа (XRD), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а также исследованы характеристики исходной золы методами ЭДС и СЭМ.

Результаты данной работы могут быть использованы для развития технологий переработки техногенных отходов, а также как основа для дальнейших исследований в области синтеза цеолитов и получения экологически безопасных функциональных материалов.

## **1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР**

### **1.1 Вопросы экологической безопасности золы уноса и перспективы её утилизации**

На сегодняшний день уголь остаётся одним из ключевых источников энергии в мире. Однако его активное использование приводит к образованию значительных объёмов золы уноса и других золошлаковых отходов на электростанциях. Такие отходы способны загрязнять почву и водные ресурсы, а также способствуют выбросу вредных веществ в атмосферу — вплоть до образования смога.

В попытке решить эту проблему золу уноса либо утилизируют на специальных полигонах, либо используют в переработке — например, в строительной отрасли. Тем не менее, хотя захоронение на первый взгляд кажется простым решением, в долгосрочной перспективе оно может привести к серьёзным экологическим последствиям. Содержащиеся в золе токсичные компоненты со временем просачиваются в грунт, загрязняя подземные и поверхностные воды [1].

Каждый год в мире образуются огромные объёмы золошлаковых отходов. Согласно ряду исследований, только в Соединённых Штатах за определённый период было произведено свыше 130 миллионов тонн таких побочных продуктов. Из них: 64,3 миллиона тонн составила зола уноса, 25,5 миллиона тонн — донная зола, около 2 миллионов тонн — котельный шлак, а ещё 28,5 миллиона тонн пришлось на гипс, полученный в процессе очистки дымовых газов от серы. В то же время в Китае общий объём золы уноса и донной золы достиг примерно 375 миллионов тонн [2].

Ожидается, что данная тенденция сохранится и в дальнейшем, поскольку во многих странах угольные ТЭС продолжают быть основным источником электроэнергии. На данный момент существующие технологии не обеспечивают достаточной замены углю на глобальном уровне. Дополнительные данные показывают, что в 2020–2021 годах только на тепловые электростанции было поставлено более 686 миллионов тонн угля, что привело к образованию примерно 232,5 миллиона тонн золы уноса за этот период [2].

В Казахстане ежегодно образуется порядка 19 миллионов тонн золошлаковых отходов. На сегодняшний день объём накопленных материалов на золоотвалах страны уже превысил 300 миллионов тонн. Только в городе Алматы, в результате многолетней работы теплоэлектроцентралей ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, было захоронено свыше 2 миллионов тонн золы и шлака [3].

Каждый отопительный сезон сопровождается дополнительным выбросом около 600 тысяч тонн золы в результате сжигания угля. Особенно заметны последствия в Туркестанской области (ранее — Южно-Казахстанская), где в городе Кентау, вблизи местной теплоэлектростанции, за годы эксплуатации образовались обширные золоотвалы. Эти накопления вывели из хозяйственного оборота большие участки земель и оказывают негативное воздействие на

окружающую среду — загрязняя почву, подземные воды и атмосферный воздух [3].

В связи с этим поиск экологически безопасных, экономически эффективных и устойчивых способов переработки золы уноса становится особенно актуальной задачей [1].

Отдельно стоит отметить, что Китай использует техногенные промышленные отходы в различных проектах гораздо активнее, чем большинство других стран (см. рисунок 1) [2].

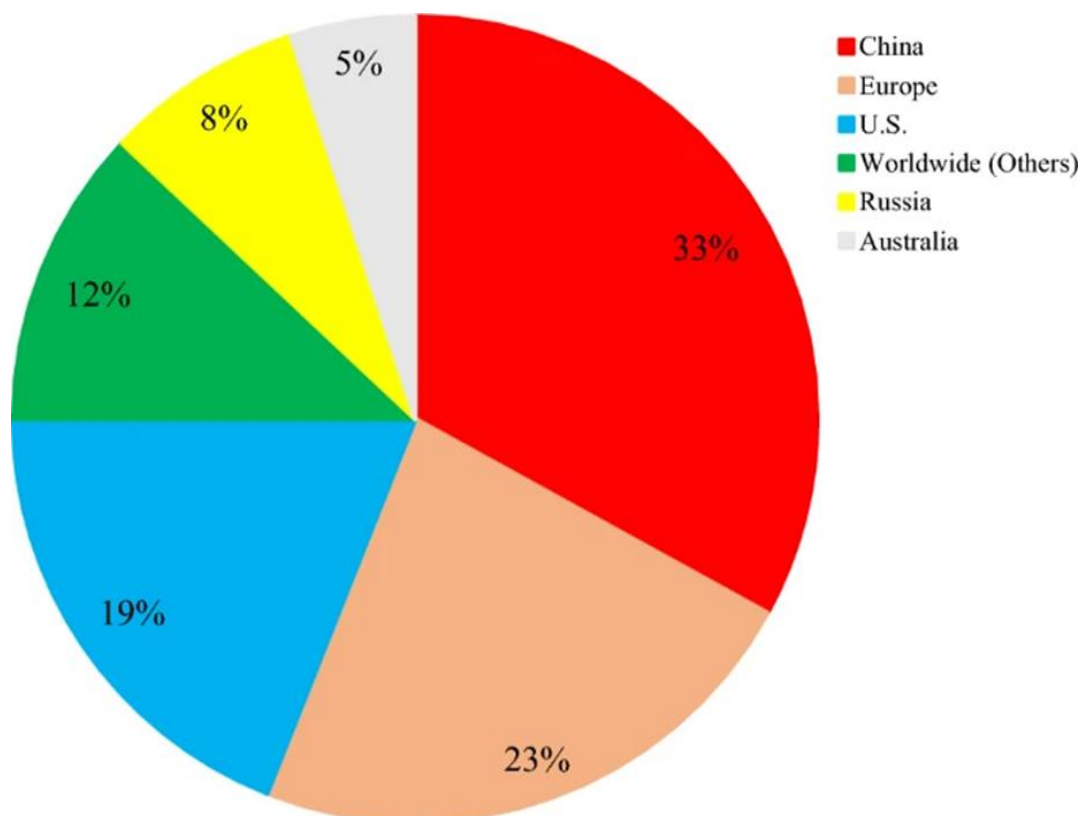


Рисунок 1 – Глобальное распределение переработки техногенных отходов (золы уноса) по странам и регионам [2].

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации золошлаковых отходов, а именно золы уноса считается её превращение в ценные материалы, такие как цеолиты [4]. Цеолиты, полученные из золы, находят широкое применение в различных отраслях благодаря своим уникальным свойствам. Они эффективно функционируют как молекулярные сита, сорбенты и ионообменные материалы [5].

На практике такие цеолиты используются, например, для восстановления плодородия почв, нейтрализации кислых шахтных вод, а также для очистки сточных вод — в особенности при удалении аммония, тяжёлых металлов, радионуклидов и органических загрязнителей. Более того, подобные цеолитные материалы могут применяться прямо на угольных ТЭС для абсорбции диоксида

серы ( $\text{SO}_2$ ) из дымовых газов. В результате этой реакции возможно получение серной кислоты, элементарной серы и других полезных соединений [4].

## 1.2 Зола уноса: состав и структурные особенности

Зола уноса, также известная как угольная летучая зола, представляет собой побочный продукт, образующийся при сжигании измельчённого угля на теплоэлектростанциях. Частицы золы, как правило, имеют сферическую форму и аморфную, стекловидную структуру. У некоторых из них имеются полости внутри — такие частицы называются пористыми. Морфологически большинство частиц обладают округлой формой, а их размеры варьируются от примерно 200 нанометров до нескольких микрометров [6].

С точки зрения внутреннего строения, зола уноса включает в себя ферросферы, ценосферы, алюмосиликатные полые сферы (плеросферы), а также фрагменты углеродистых частиц с неправильной формой [6]. В отдельных случаях встречаются частицы с нарушенной геометрией, что указывает на то, что процесс горения угля происходил при температуре порядка 850–900 °C [7].

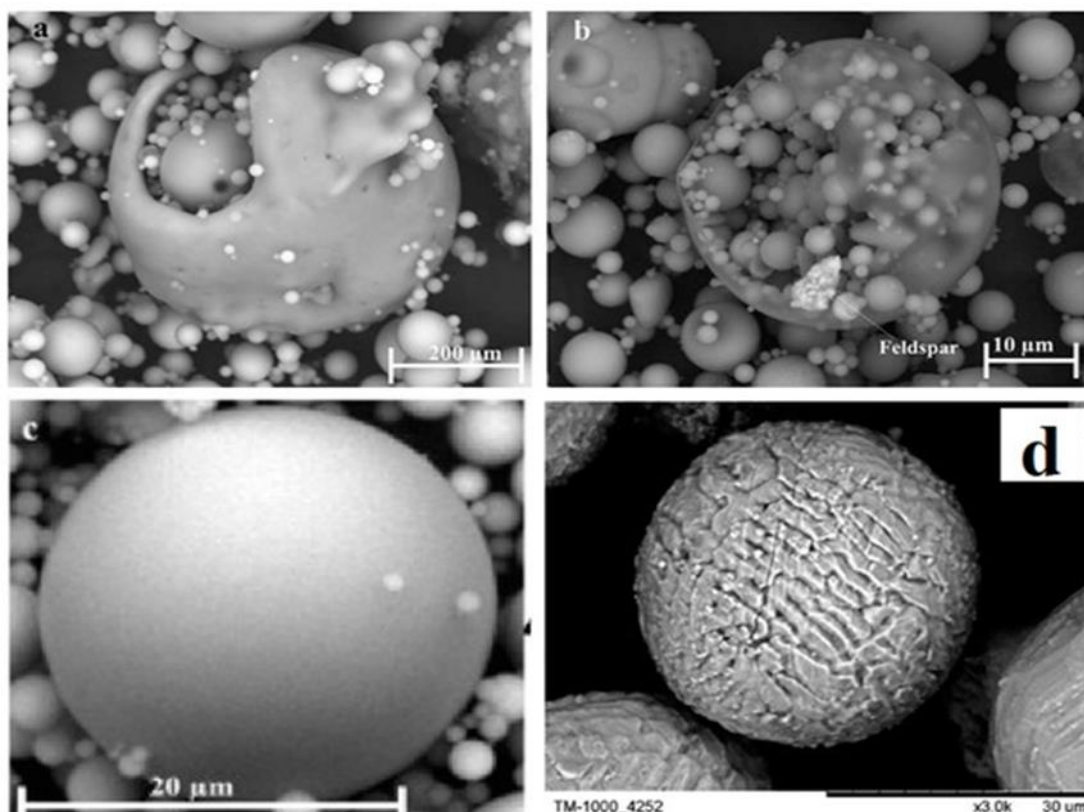


Рисунок 2 – Морфологические разновидности частиц золы уноса на SEM-снимках: плеросферы (a, b), ценосферы (c), ферросферы (d) [8]

## 1.3 Влияние параметров сгорания на свойства золы

Частицы золы уноса могут значительно различаться по цвету — от светло-коричневого и оранжевого до тёмно-серого и практически чёрного. Эти цветовые



вариации обусловлены, прежде всего, содержанием в золе несгоревших остатков углерода и железа [9]. Повышенная концентрация железа, как правило, придаёт золе коричневатый оттенок, в то время как избыток углерода делает её цвет более тёмным — от тёмно-серого до чёрного. Светлые или коричневые тона, напротив, могут свидетельствовать о высоком содержании извести (соединений кальция) в составе [2].



Рисунок 3 – Разнообразие окраски золы уноса: (а) светло-серая, (б) тёмно-серая, (с) почти чёрная, (d) коричневатая. Цветовая вариативность обусловлена содержанием железа, углерода и кальция в образцах [10].

Что касается химического состава, зола уноса содержит практически все элементы, типичные для геологических пород — включая металлы, тяжёлые металлы и органические соединения. Хотя её базовая минеральная основа во многом одинакова по всему миру, конкретные характеристики материала зависят от многих факторов: типа используемого угля, его географического происхождения, температурных условий горения и технологических параметров котельного оборудования [11].

## 1.4 Химический состав золы уноса

Зола уноса, образующаяся при сжигании угля, отличается высоким содержанием минеральных компонентов. Основу её химического состава составляют кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), которые считаются главными компонентами данного материала. Помимо них, в золе в меньших количествах присутствуют и другие оксиды — такие как рутил ( $\text{TiO}_2$ ), оксиды калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ), кальция ( $\text{CaO}$ ), натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), фосфорные соединения, а также следы оксидов меди ( $\text{Cu}$ ), хрома ( $\text{Cr}$ ), цинка ( $\text{Zn}$ ), никеля ( $\text{Ni}$ ) и молибдена ( $\text{Mo}$ ) [12,13].

Также в золе уноса могут содержаться токсичные и тяжёлые металлы, в том числе алюминий ( $\text{Al}$ ), никель ( $\text{Ni}$ ), кобальт ( $\text{Co}$ ), кадмий ( $\text{Cd}$ ), мышьяк ( $\text{As}$ ) и ртуть ( $\text{Hg}$ ). Наличие таких элементов делает золу потенциально опасной для живых организмов и окружающей среды. Именно поэтому в ряде случаев она классифицируется как экологически опасный материал и нуждается в переработке [14].

## 1.5 Цеолиты

Само слово «цеолит» произошло от двух греческих корней: «zeo» — кипеть и «lithos» — камень, что в дословном переводе означает «кипящий камень». Этот термин был введён в научный обиход в 1756 году шведским минералогом Акселем фон Кронштедтом, когда он наблюдал минерал, выделяющий влагу при нагревании. Из-за способности к так называемой интумесценции (набуханию при нагреве) минерал казался кипящим, за что и получил своё название. Позднее это вещество было идентифицировано как стильбит.

С тех пор было обнаружено множество минералов с аналогичными свойствами, и сегодня под термином «цеолиты» подразумевают целую группу минералов. В природных условиях они преимущественно образуются в результате вулканической активности — под действием метеорных вод в зонах извержения или в результате химической трансформации вулканического пепла, осевшего в солёных озёрах. Во втором случае со временем формируются крупные поверхностные залежи цеолитов. Подобные месторождения сегодня разрабатываются промышленно: цеолиты используются как строительный материал, в сельском хозяйстве для восстановления почв, при очистке сточных вод, а также в качестве добавки в корм для животных.

Цеолитная структура представляет собой пористую систему с микроканальными порами и полостями, в которых содержатся молекулы воды и ионы. При нагревании вода легко испаряется, а катионы способны участвовать в ионном обмене. Размер пор в решётке достаточен для проникновения органических молекул [15].

Одним из наиболее перспективных направлений переработки золы уноса является её превращение в цеолитные материалы. Цеолиты, полученные таким образом, отличаются невысокой стоимостью и в то же время высокими

сорбционными и ионообменными характеристиками. Они применяются, в частности, для восстановления плодородия почв, нейтрализации кислотных шахтных вод, удаления аммония, тяжёлых металлов, радионуклидов и органических соединений из сточных вод. Кроме того, такие цеолиты могут использоваться непосредственно на угольных ТЭС для улавливания диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) из дымовых газов, что позволяет впоследствии получать серную кислоту, элементарную серу и другие полезные продукты [16].

С научной точки зрения цеолиты — это кристаллические, микропористые, гидратированные алюмосиликаты. Их структура представляет собой бесконечную трёхмерную решётку, построенную из связанных между собой тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  и  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ , объединённых через общие атомы кислорода. В более общем виде цеолит можно рассматривать как неорганический полимер, состоящий из повторяющихся  $\text{TO}_4$ -единиц, где Т — это либо кремний ( $\text{Si}^{4+}$ ), либо алюминий ( $\text{Al}^{3+}$ ). При этом каждый атом кислорода связывает два таких тетраэдра, формируя устойчивую пространственную сетку [17].

## **1.6 Классификация и происхождение природных и синтетических цеолитов**

Цеолиты подразделяются на две основные категории: природные и синтетические. На сегодняшний день науке известно более 200 разновидностей цеолитов, из которых около 50 встречаются в природе, а остальные более 150 типов являются результатом лабораторного или промышленного синтеза. Природные цеолиты преимущественно образуются в результате вулканических процессов. Одним из наиболее распространённых минералов этого класса считается клиноптилолит. Синтетические аналоги, в свою очередь, производятся на основе как природного сырья (например, каолина), так и искусственно полученных компонентов — таких как натрий алюминат и кремнезем [18].

Большинство природных цеолитов формируются в условиях вулканической активности. В момент извержения магма — расплавленная горная масса — прорывается через земную кору, выходя на поверхность в виде лавы. Вместе с лавой выделяются газы, пепел и вулканическая пыль. Чаще всего такие процессы происходят в зонах столкновения или расхождения тектонических плит. Если подобные явления наблюдаются вблизи моря или на островах, то значительная часть лавы и пепла попадает в морскую воду. Там, в результате взаимодействия горячей лавы с солёной водой и растворёнными солями, на протяжении тысячелетий происходят химические преобразования, приводящие к образованию цеолитов — кристаллических твёрдых соединений [19].

## **1.7 Строение структуры цеолита**

Как уже упоминалось ранее, основа кристаллической структуры всех цеолитов — это алюмосиликатный каркас. Он формируется благодаря тетраэдрическому соединению кремниевых ( $\text{Si}^{4+}$ ) и алюминиевых ( $\text{Al}^{3+}$ ) катионов

с кислородными анионами ( $O^{2-}$ ). При этом каждый атом кислорода одновременно участвует в связывании двух катионов, связывая между собой соседние тетраэдры. Такая пространственная организация приводит к образованию прочной трёхмерной сети из  $SiO_2$ - и  $AlO_2$ -блоков (см. рисунок 1.3.1).

Каждая тетраэдрическая единица состоит из одного центрального катиона (кремния или алюминия), окружённого четырьмя атомами кислорода. Это создаёт устойчивую силикатную структуру с соотношением между кремнием и кислородом, равным 1:2, характерную для цеолитных каркасов [19].

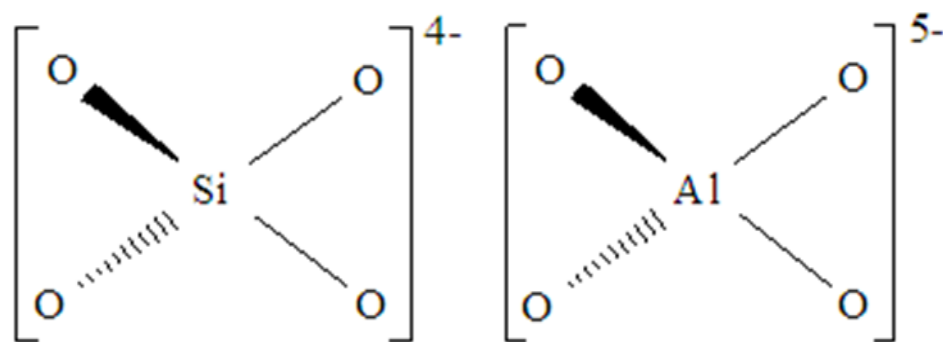


Рисунок 4 – Тетраэдрическая организация молекул  $SiO_4$  и  $AlO_4$ , формирующих структурные единицы цеолитного каркаса [18]

Общая химическая формула цеолитов определяется на основе их кристаллографической элементарной ячейки и может быть представлена следующим образом:

$$M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot wH_2O \quad (1) \quad [16]$$

где:

$M$  — катион щелочного или щелочноземельного металла,

$n$  — валентность данного катиона,

$w$  — количество молекул воды, приходящихся на одну элементарную ячейку,

$x$  и  $y$  — общее число тетраэдрических единиц в ячейке.

Отношение  $y/x$  (кремний к алюминию) обычно находится в диапазоне от 1 до 5, однако в цеолитах с повышенным содержанием кремнезёма этот показатель может достигать значений от 10 до 100 [20].

Содержащиеся в структуре цеолитов молекулы воды находятся в адсорбированном состоянии в порах и в микрополостях кристаллической решётки, размер которых варьируется от 0,3 до 1,0 нм. Эти пустоты образуются благодаря трёхмерной сетке, построенной из связанных между собой тетраэдров: каждый тетраэдр состоит из атома кремния, окружённого четырьмя атомами кислорода. Связи  $Si-O$  образуют пространственную структуру, в которой формируются каналы и каверны. Эти полости, как правило, заполнены молекулами воды и подвижными катионами, способными к ионному обмену [19].

При нагревании либо при процессе дегидратации цеолит теряет воду, при этом его структура сохраняется, а внутренние пустоты становятся более выраженными. Именно благодаря этому цеолиты начинают проявлять свойства молекулярных сит и сорбентов. Такие структуры позволяют пропускать внутрь лишь те молекулы, размер которых не превышает диаметр пор. Крупные молекулы, напротив, задерживаются снаружи. После удаления воды цеолит способен избирательно поглощать газы и жидкости, если их молекулы достаточно малы для прохождения через входные каналы, в то время как более крупные молекулы исключаются [19].

### **1.8 Преимущества синтетических цеолитов и особенности их синтеза**

В настоящее время синтетические цеолиты используются в промышленности значительно шире, чем природные аналоги. Это объясняется, прежде всего, высокой степенью чистоты их кристаллической структуры и равномерным размером частиц. Первые синтезы цеолитов проводились с применением стандартных лабораторных химикатов. Однако, несмотря на развитие синтеза, основополагающие исследования в области цеолитов долгое время велись преимущественно на основе природных минералов.

Главное преимущество синтетических цеолитов заключается в возможности управлять их химическим составом и размером пор — в зависимости от поставленных задач. Кроме того, они демонстрируют более высокую термическую стабильность. В отличие от них, природные цеолиты показывают относительно слабую ионообменную способность по отношению к ряду ионов, таким как медь (Cu), цезий (Cs), кобальт (Co) и уран (Ur). Это стало причиной активного интереса учёных к разработке методов повышения ионообменных характеристик цеолитов [20].

Наиболее распространённым методом получения синтетических цеолитов является гидротермальный синтез. Он основан на кристаллизации алюмосиликатных гелей, полученных путём смешивания растворов натрия алюмината и кремнезема в щелочной среде. Процесс проводится в герметичных реакторах при постепенно повышающихся температуре и давлении и может длиться от нескольких часов до нескольких суток [20].

На формирование типа цеолита в ходе синтеза влияют следующие ключевые факторы:

Состав реакционной смеси, в том числе соотношение кремния к алюминию (Si/Al), концентрация гидроксид-ионов ( $\text{OH}^-$ ) и присутствие неорганических катионов:

1.Повышение значения Si/Al оказывает существенное влияние на физико-химические свойства конечного продукта;

2. $\text{OH}^-$  ионы играют важную роль в транспортировке силикатов из твёрдой фазы в раствор, влияя на скорость зарождения кристаллов;

3.Неорганические катионы выполняют функцию направляющих агентов структуры и участвуют в уравнивании заряда цеолитного каркаса.



Кроме состава реакционной среды, на процесс синтеза цеолитов влияют и другие важные параметры:

- Природа исходных реагентов и предварительная обработка:
- Использование неорганических прекурсоров способствует формированию гидроксильных поверхностей, тогда как органические компоненты упрощают внедрение металлов в кристаллическую решётку.
- Температурный режим:
- Повышение температуры ускоряет процесс кристаллизации цеолита, однако одновременно может снизить скорость зарождения кристаллических центров.
- Продолжительность реакции:
- Время кристаллизации должно быть таким, чтобы предотвратить образование побочных фаз и в то же время обеспечить формирование целевой цеолитной структуры.
- Водородный показатель среды (pH):
- Формирование цеолита осуществляется в щелочной среде — при значениях pH выше 10.
- Дополнительные технологические условия:
- Синтез может проводиться как в непрерывном, так и в полу непрерывном режиме, что значительно повышает производственную эффективность и делает процесс пригодным для масштабного применения [20].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Исходные материалы и реагенты, использованные для синтеза цеолита

Соляная кислота ( $\text{HCl}$ , ~36%)

Гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ )

Деминерализованная вода ( $\text{H}_2\text{O}_{\text{dem}}$ )

Зола уноса. Образец золы уноса был взят из Павлодарского ТЭЦ-3.

### 2.2 Синтез цеолита

Данный метод синтеза цеолита типа Na-x был предложен авторами: Bharat Gajanan Tarmale, Rama Sadashiv Lokhande, Sandeep Ramakant Naik в их научной работе [21]. Метод основывается на гидротермальном синтезе с преждевременной щелочной плавкой.

Зола Уноса содержит не сгоревший углерод 6–9%. Для того чтобы удалить этот углерод, нужно его прокалить в муфельной печи в течение 4 часов при температуре 850 градусов по Цельсию. Данный процесс так же называется кальцинация [21].



Рисунок 5-Муфельная печь, разогретая до 850 градусов Цельсия и зола уноса

Следующий этап — это обработка золы уноса соляной кислотой. На этапе кислотной обработки зола уноса обрабатывалась 20% раствором соляной кислоты при температуре 60 °C в течение одного часа на магнитной мешалке. Соотношение золы уноса к соляной кислоте 1 к 5. Точнее 15 грамм золы уноса и 75 мл 20%  $\text{HCl}$  [21].

Цель процесса — удалить нежелательные примеси, такие как оксиды железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), кальция ( $\text{CaO}$ ) и магния ( $\text{MgO}$ ), которые могут мешать формированию правильной цеолитной структуры.



Рисунок 6-Кислотная обработка золы уноса на магнитной мешалке

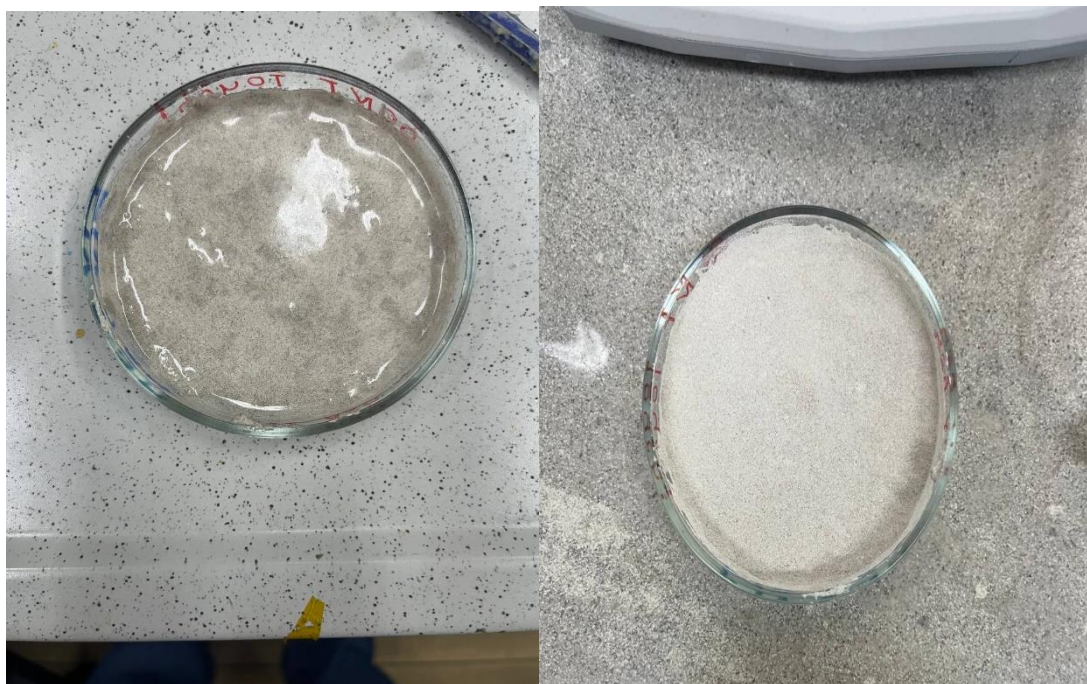
Затем проводилась фильтрации смеси от соляной кислоты до нейтрального  $\text{pH}=7$  с помощью дистиллированной воды и фильтрующей бумаги.





### Рисунок 7-Процесс фильтрации

После фильтрации обработанный образец золы уноса был помещён в сушильный шкаф и выдержан при температуре 60 °С в течение ночи для полного высушивания [21].

[illegible]

На следующем этапе обработанный образец золы уноса был подвергнут щелочной плавке с гидроксидом натрия, взятым в массовом соотношении 1:2,25 [21]



а б  
Рисунок 9 – Соотношение (а) золы уноса к (б) NaOH

Смесь предварительно тщательно перемешали и измельчили вручную до порошкообразного состояния с помощью фарфоровой ступки.



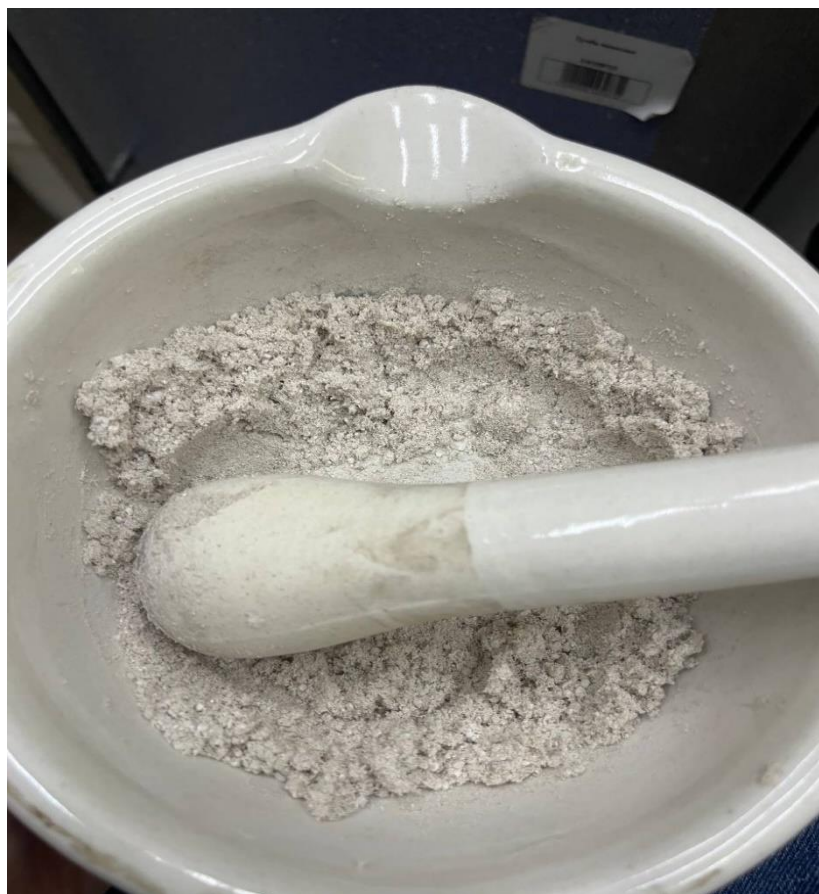


Рисунок 10– Измельчение и перемешивание золы уноса с NaOH

Процесс плавления осуществлялся в муфельной печи при температуре 500 °С в течение одного часа [21].



Рисунок 11 – Процесс плавления в муфельной печи

Основной задачей щелочной плавки является разрушение устойчивых кристаллических фаз золы уноса, таких как муллит и кварц, с последующим переводом кремния и алюминия в растворимые соединения — натрий силикат ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и натрий алюминат ( $\text{NaAlO}_2$ ).

Затем после плавки мы получили спеченную смесь и дали ей остыть до комнатной температуры. После того как смесь остудилась до комнатной температуры мы измельчили ее до порошкообразного состояния.

После измельчения получается реакционно-активный порошок, который готов к гидротермальной обработке. Уже на этом этапе после плавки материал содержит основные строительные блоки для будущего цеолита — растворимые силикаты и алюминаты натрия, которые в последующих стадиях (перемешивание, старение) будут образовывать алюмосиликатную структуру цеолита.



Рисунок 12 – Спеченная (а) – масса после плавки, (б) – масса после измельчения

Следующим шагом было приготовления суспензии для гидротермального старения. На этом этапе проводилось формирование суспензии из сплавленного порошка, полученного после щелочной активации, с последующим его гидротермальным старением. Целью данного этапа является создание условий, при которых алюмосиликаты натрия постепенно образуют кристаллическую структуру цеолита.

Для начала взвешивали 10 граммов предварительно измельчённого порошка и помещали его в лабораторную колбу. Затем к нему добавляли 100 миллилитров деминерализованной воды. Смесь перемешивалась при помощи

магнитной мешалки в течение 6 часов со скоростью 640 оборотов в минуту. Процесс проводился при комнатной температуре [21].

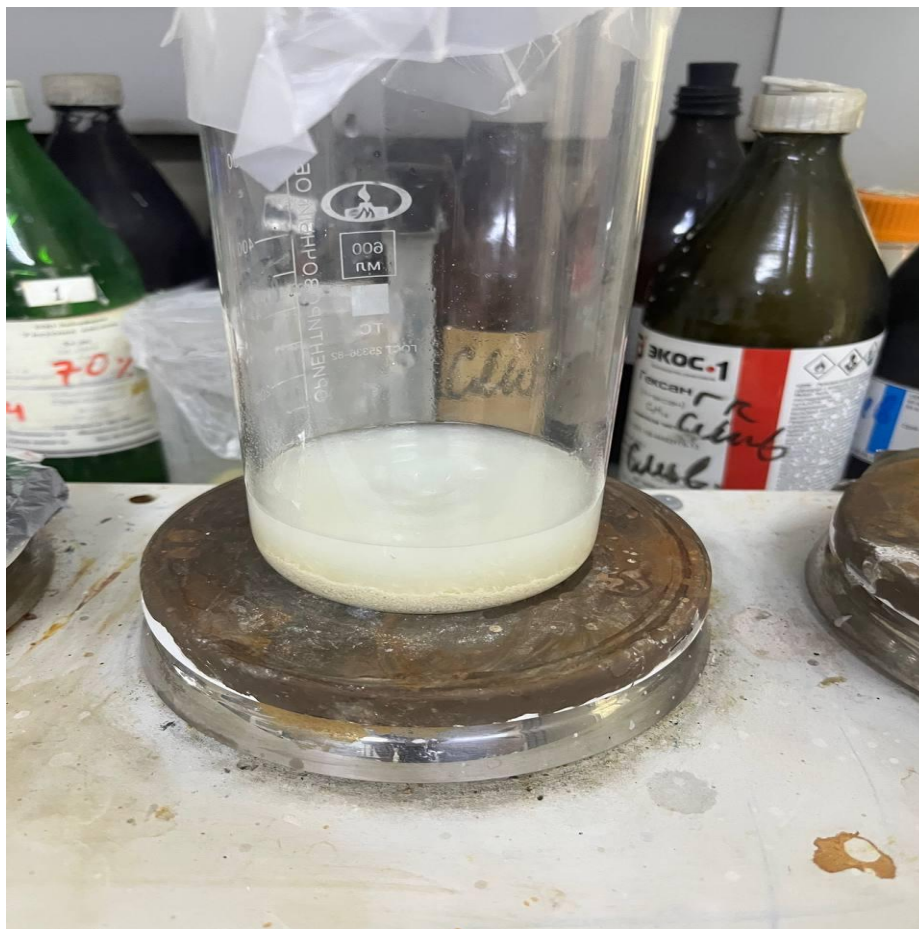


Рисунок 13 – Перемешивание суспензии на магнитной мешалке

После перемешивания суспензия герметично накрывалась. Ёмкость с раствором ставилась на магнитную мешалку, где она выдерживалась при температуре 90 градусов цельсия в течение 6 часов без механического воздействия. Это и есть этап гидротермального старения. В течение этого времени перемешивание не осуществлялось, так как для образования качественного цеолитного каркаса требуется стабильная среда без механических воздействий [21].



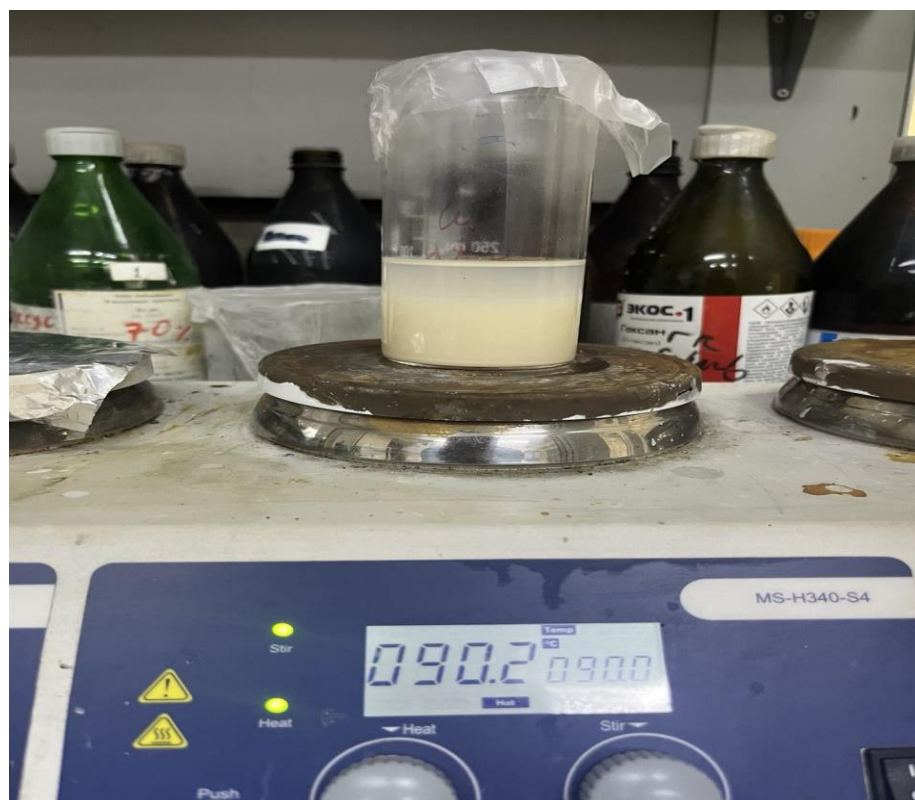
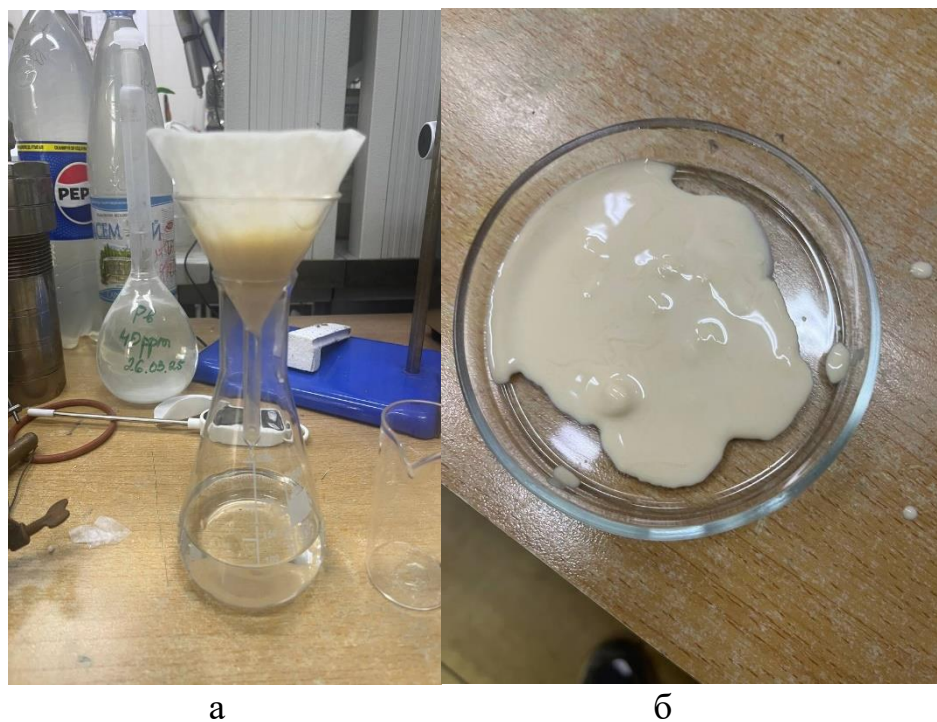


Рисунок 14 – Процесс старения

По завершении старения суспензия переходила к следующему этапу обработки — фильтрации и промывке до 9–10 pH.



а

б

Рисунок 15 – Процесс (а) – фильтрации и промывки, (б) – полученная смесь

Затем данная смесь была помещена в сушильный шкаф на 4 часа при температуре 80 градусов цельсия для процесса сушки [21].



Рисунок 16 – Материал после сушки

Затем наш материал был вручную измельчен. Полученный после этого материал содержал цеолитную фазу, формировавшуюся за счёт взаимодействия растворённых форм кремния и алюминия при заданных условиях.

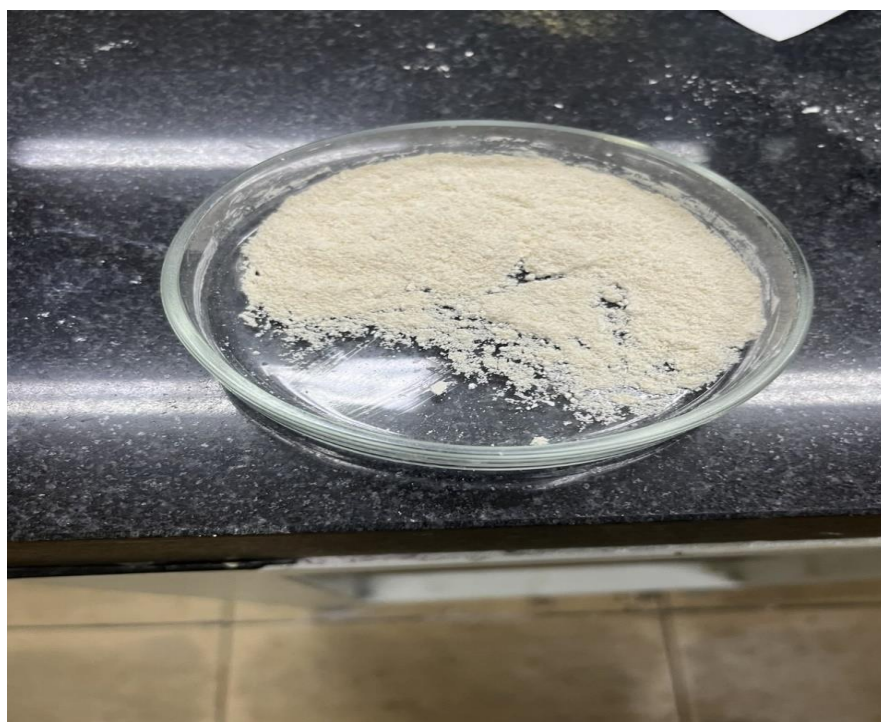


Рисунок 17 – Полученный итоговый материал (цеолит)



После завершения всех этапов синтеза был рассчитан массовый выход готового цеолита. Для расчёта использовалась масса золы уноса, которая пошла в реакцию после кислотной обработки. На данном этапе в работу было взято 10 граммов золы, к которым добавляли 22,5 грамма NaOH, согласно методике.

На выходе после всех стадий (плавки, перемешивания, старения, фильтрации и сушки) удалось получить 2,4178 грамма сухого цеолита. Чтобы определить, насколько эффективен полученный результат, был рассчитан процент выхода:

$$\text{Выход цеолита (\%)} = \frac{\text{масса цеолита}}{\text{масса золы уноса}} \times 100\% \quad (1)$$

Подставим значения:

$$\frac{2,418 \text{ грамм}}{10 \text{ грамм}} \times 100\% = 24,18\%$$

Таким образом, массовый выход составил 24,18%, что считается хорошим результатом.

В научной работе из которого была взята методика при аналогичных условиях выхода цеолита X, составляли от 20 до 25% [21].

### **2.3 Изучение физико-химических свойств золы уноса**

Образец золы уноса, использовавшийся основным сырьем в синтезе цеолита был взят из Павлодарского ТЭЦ – 3. В качестве анализа были взяты изображение СЭМ.

На рисунке представлено изображение золы-уноса, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микрозондового анализа на установке JEOL JED-2300. Анализ проводился до этапа синтеза цеолита, с образцом золы-уноса, полученной на ТЭЦ города Павлодар.

С целью количественной оценки морфологии золы уноса было проведено измерение размеров сферических частиц на СЭМ-изображениях с использованием программы «ImageJ». Калибровка масштаба проводилась по встроенной шкале 50  $\mu\text{m}$ . Результаты измерений трёх типичных сферических частиц показали, что их диаметры составляют 34.6–37.8  $\mu\text{m}$ , а средний размер — порядка 35.7  $\mu\text{m}$ . Морфология частиц преимущественно сферическая, что подтверждает характерный внешний вид золы уноса, образующейся при высокотемпературном сжигании угля.

Подобные сферические образования, как правило, состоят из аморфных алюмосиликатов, что в дальнейшем способствует их переработке в цеолитные структуры при щелочной активации.

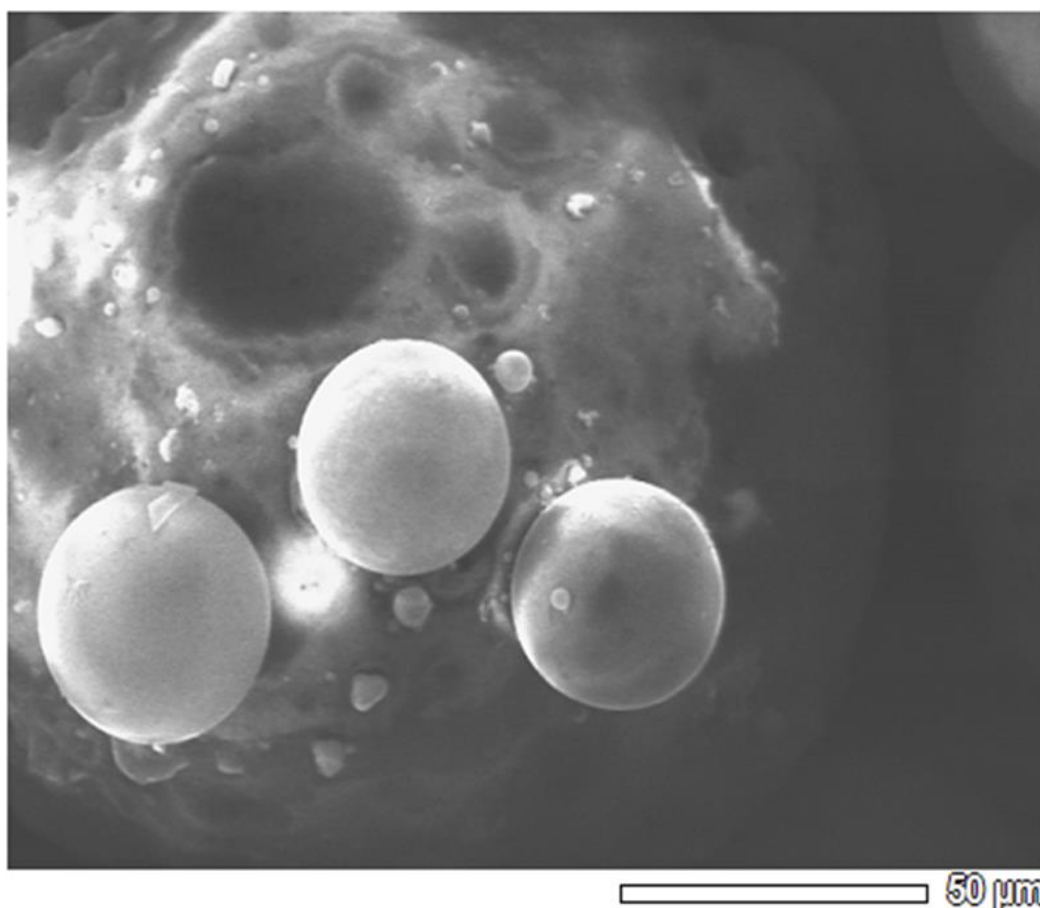


Рисунок 18 - СЭМ-изображение золы уноса (x750)

В энергодисперсионном спектре (EDS) образца золы уноса (см. рисунок 19) показаны основные пики, соответствующие элементному составу золы уноса. Наибольшую интенсивность имеют сигналы от кремния (Si) и алюминия (Al), что свидетельствует о преобладании алюмосиликатной фазы в исследуемом образце. Также определены менее выраженные пики натрия (Na), кальция (Ca), магния (Mg), железа (Fe) и серы (S). Такой состав характерен для золы уноса, полученной при сжигании угля, и подтверждает возможность её использования в качестве сырья для синтеза цеолитов.

Анализ выполнен методом энергодисперсионной спектроскопии при ускоряющем напряжении 30 кВ.

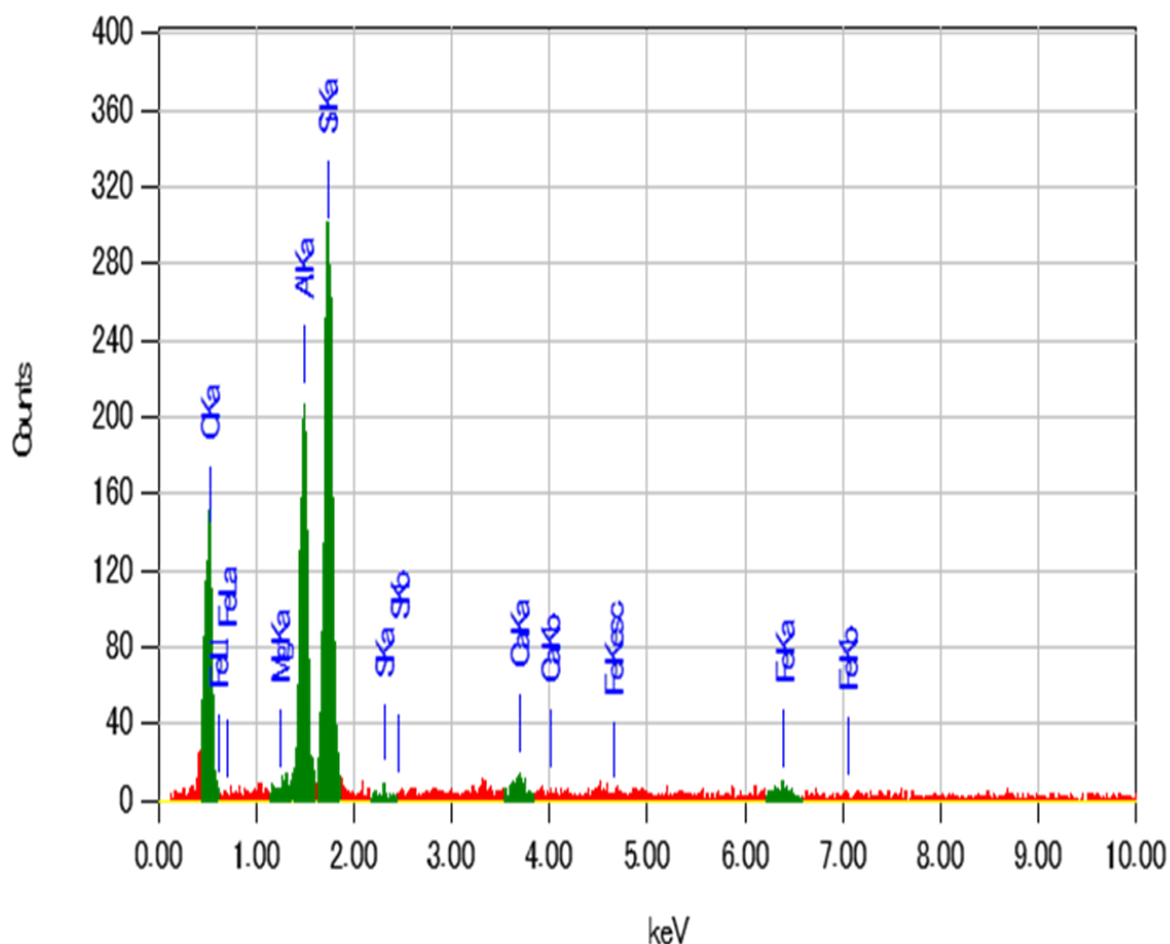


Рисунок 19 - Энергодисперсионный спектр (EDS) образца золы уноса

В таблице 1 представлены данные по массовому содержанию химических элементов и соответствующих им оксидов, полученные методом энергодисперсионного анализа.

Таблица 1 – Результаты количественного элементного анализа золы уноса

| Element | (Kev) | Mass% | Counts  | Error% | Mol%  | Com-<br>pound                  | Mass% | Ca-<br>tion | K       |
|---------|-------|-------|---------|--------|-------|--------------------------------|-------|-------------|---------|
| O       |       | 50.06 |         |        |       |                                |       |             |         |
| Mg K    | 1.253 | 0.10  | 9.88    | 0.21   | 0.29  | MgO                            | 0.16  | 0.03        | 0.9661  |
| Al K    | 1.486 | 18.37 | 1769.32 | 0.27   | 23.93 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34.72 | 5.22        | 0.9967  |
| Si K    | 1.739 | 28.39 | 2724.53 | 0.33   | 71.03 | SiO <sub>2</sub>               | 60.73 | 7.75        | 1.0000  |
| S K     | 2.307 | 0.22  | 17.95   | 0.40   | 0.49  | SO <sub>3</sub>                | 0.56  | 0.05        | 1.1970  |
| Ca K    | 3.690 | 1.36  | 90.94   | 0.35   | 2.39  | CaO                            | 1.91  | 0.26        | 1.4398  |
| Fe K    | 6.398 | 1.49  | 56.83   | 0.53   | 1.88  | FeO                            | 1.92  | 0.20        | 2.51.95 |
| Total   |       | 100   |         |        | 100   |                                | 100   | 13.53       |         |

Основными компонентами образца являются диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), чья суммарная масса превышает 95% от всех определённых соединений.

Присутствие оксидов кальция ( $\text{CaO}$ ), железа ( $\text{FeO}$ ), магния ( $\text{MgO}$ ) и триоксида серы ( $\text{SO}_3$ ) объясняется природой золы уноса и составом исходного угля. Высокое содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  подтверждает алюмосиликатную природу образца и его пригодность для последующего получения цеолитных материалов.

## 2.4 Изучение физико-химических свойств цеолита

Морфология синтезированного цеолита была изучена методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при различных увеличениях:  $\times 200$ ,  $\times 500$  и  $\times 1000$ . На рисунке 20 представлены снимки поверхности материала, полученного после обработки золы уноса и синтеза цеолита типа Na-X.

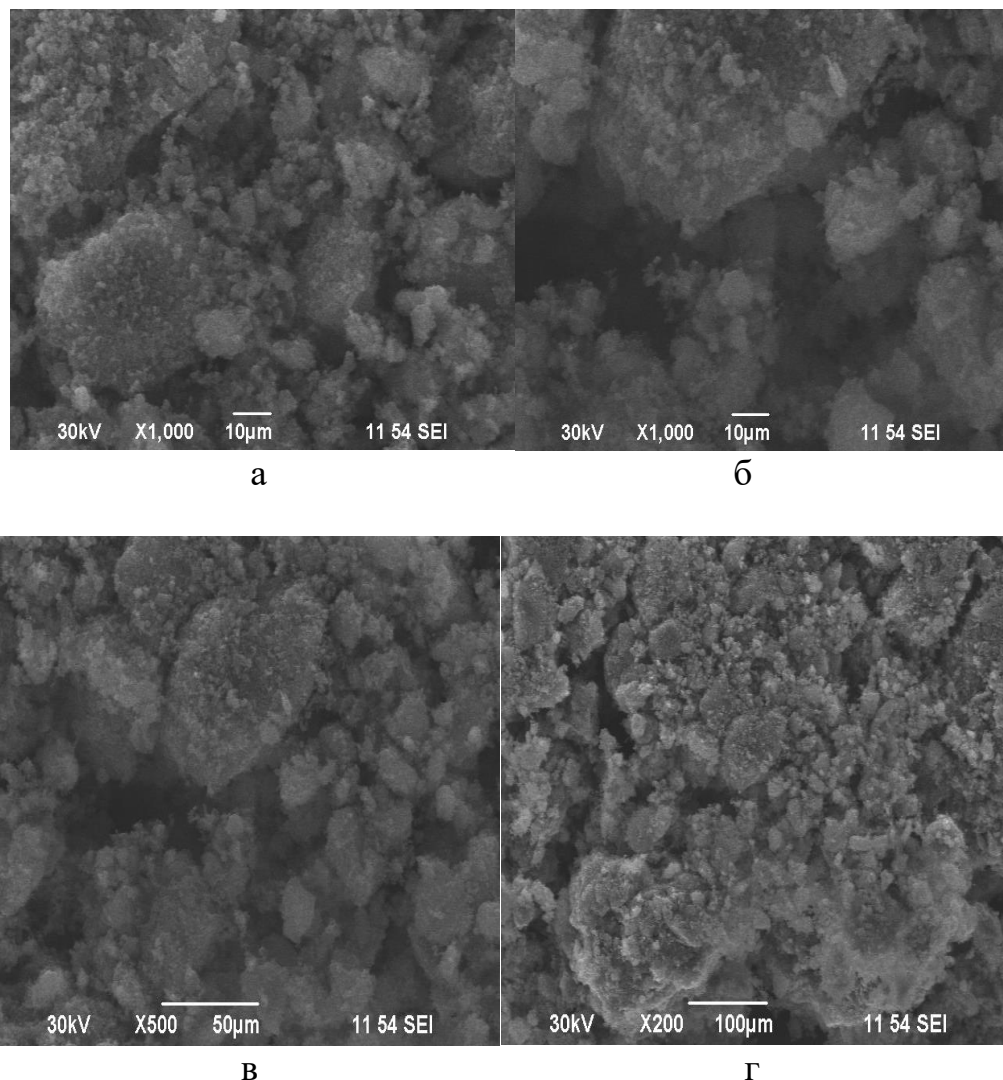


Рисунок 20 – СЭМ-изображения цеолитного материала при различных увеличениях ( $\times 1000$ (а, б),  $\times 500$ (в),  $\times 200$ (г))



При увеличении  $\times 200$  хорошо прослеживается общий характер поверхности исследуемого материала. Частицы формируют рыхлую, слабо упорядоченную структуру, с наличием агломератов различной плотности. Подобная картина характерна для продуктов гидротермального синтеза из техногенного сырья, где одновременно могут присутствовать и сформированные кристаллы, и остаточные аморфные фазы.

На изображении  $\times 500$  структура становится более различимой: отдельные зерна проявляют признаки кристалличности. Некоторые частицы приобрели чётко очерченную форму, указывающую на начало образования цеолитной решётки. Поверхность частиц становится более шероховатой, что может свидетельствовать о развитии пористости.

На наиболее детализированных снимках при увеличении  $\times 1000$  наблюдаются частично сформированные микрочастицы. Видны угловатые грани и многогранные элементы, характерные для цеолитов типа Na-X (фауяситовой структуры). Размер кристаллитов варьируется от 2 до 10 мкм.

Для определения того, какая именно кристаллическая фаза образовалась в результате синтеза цеолита, был проведён рентгенофазовый анализ (см. рисунок 21). Полученная рентгенограмма отражает структуру материала, полученного после щелочной обработки золы уноса.

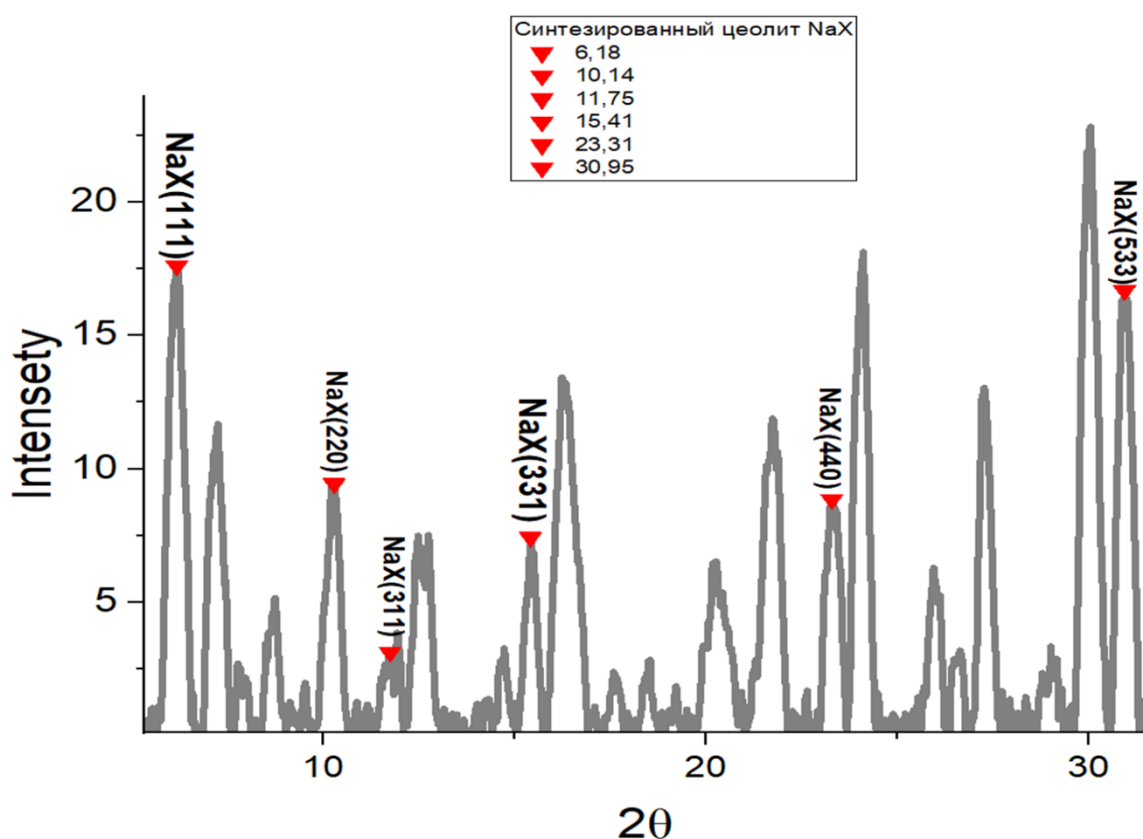


Рисунок 21 – Рентгенофазовый анализ синтезированного цеолита

На рентгенограмме отчётливо видны резкие пики, указывающие на наличие кристаллических компонентов в образце. Наиболее выраженные

сигналы наблюдаются в диапазонах углов  $2\theta$  около  $6.1^\circ$ ,  $10.0^\circ$ ,  $11.7^\circ$ ,  $15.4^\circ$ ,  $23.3^\circ$  и  $31.0^\circ$ . Эти значения были сопоставлены с характеристиками цеолита Na-X (фауяситовая структура), которые приведены в международной базе данных IZA (International Zeolite Association) (см.рис.22). Совпадение основных пиков по углам дифракции даёт основание предполагать, что в образце действительно сформировалась структура, характерная для цеолита типа Na-X.

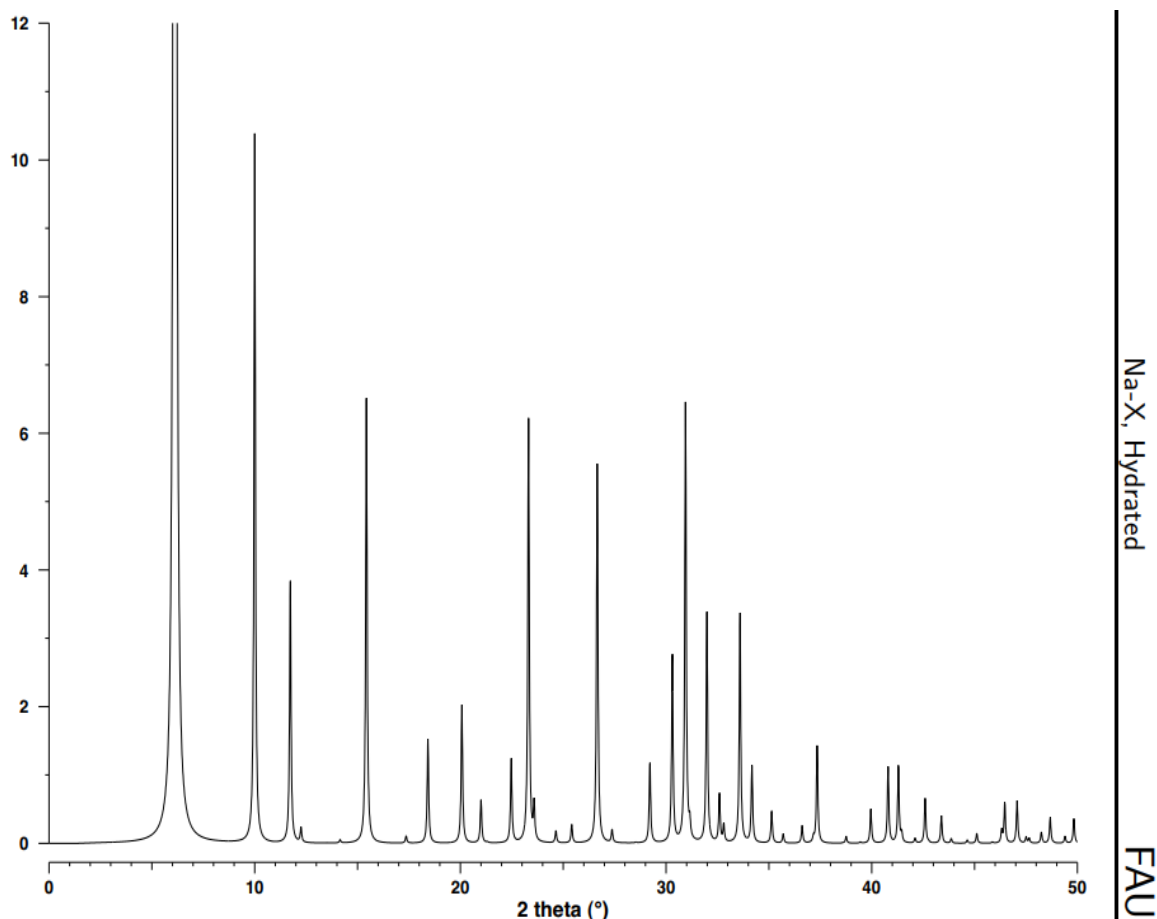


Рисунок 22 – Дифрактограмма цеолита Na-X [22]

Особое внимание следует обратить на пик в районе  $6.1^\circ$ , который в эталонных данных соответствует плоскости (111) и обычно обладает наибольшей интенсивностью. Также были обнаружены сигналы в областях, где ожидаются второстепенные отражения Na-X, включая пики при  $10^\circ$ ,  $15.4^\circ$  и  $23.3^\circ$ . В целом, интенсивность отражений в образце отличается по сравнению с эталоном, что, скорее всего, связано с тем, что присутствует аморфная составляющая, унаследованной от исходной золы уноса, что часто встречается во многих работах синтеза цеолита из золы уноса.

В совокупности результаты рентгенофазового анализа указывают на формирование цеолитной структуры Na-X, что, в свою очередь, подтверждается рядом морфологических признаков, выявленных на электронно-микроскопических изображениях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения дипломной работы была успешно реализована методика синтеза цеолита типа Na–X на основе золы уноса, собранной с Павлодарской ТЭЦ-3. Для подготовки материала были проведены этапы кальцинации, кислотной и щелочной обработки, а также гидротермального старения.

Результаты рентгенофазового анализа показали наличие характерных дифракционных пиков цеолита Na–X, которые совпадают с эталонными данными международной базы IZA. Это подтверждает успешное формирование фауяситовой цеолитной структуры. Морфологический анализ методом СЭМ продемонстрировал пористую микрозернистую структуру с агломератами частиц, что также характерно для цеолитов Na–X, полученных из золы уноса.

До начала синтеза была проведена предварительная оценка свойств золы методом СЭМ и ЭДС, что позволило подтвердить её пригодность как алюмосиликатного сырья. Выход цеолита составил 24,18% от массы исходного сырья, что соответствует показателям, описанным в литературе.

Полученные данные подтверждают, что техногенные отходы угольной энергетики, такие как зола уноса, могут эффективно использоваться для получения функциональных цеолитных материалов. Это открывает перспективы дальнейшей переработки отходов с экологической и экономической точки зрения.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

**ТЭЦ** – теплоэлектроцентраль

**СЭМ** – сканирующая электронная микроскопия

**EDS** – энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия

**XRD** – рентгеновская дифракция

**Na-X** – цеолит типа натрий-X

**IZA** – международная ассоциация цеолитов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Eom J.Y., Yang S.J., Lee M.J., Yang Y.R., Wie Y.M., Lee K.G., Lee K.H. Recycling Fly Ash into Lightweight Aggregate: Life Cycle Assessment and Economic Evaluation of Waste Disposal // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – №9. – С. 9271.
2. Alqawasmeh H.M. Enhancing the sustainability of geotechnical engineering with utilization of fly ash // Discover Materials. – 2025. – Vol. 5. – №11. – DOI: 10.1007/s43939-025-00183-0.
3. Ахмедьянов А.У., Киргизбаева К.Ж., Туреханова Г.И. Вторичная переработка отходов (золошлаков) промышленных предприятий // Технические науки. Горное дело. – 2018. – №10. – С. 22–27.
4. Берман И.Ф., Кельцев Н.В., Смола В.И., Гузиев И.С., Михайлов А.С. Адсорбционные свойства природных цеолитов по двуокиси серы // Природные цеолиты. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 56–62.
5. Kotova O., Shushkov D. A process of zeolites production from fly ash // Обогащение руд. – 2015. – №5. – С. 60–63. – DOI: 10.17580/or.2015.05.10.
6. Choudhary N., Yadav V.K., Malik P., Khan S.H. и др. Recovery of natural nanostructured minerals: ferrospheres, plerospheres, cenospheres, and carbonaceous particles from fly ash // Handbook of Research on Emerging Developments and Environmental Impacts of Ecological Chemistry / под ред. D. Gheorghe, V. Ashok. – Hershey (PA, USA): IGI Global, 2020. – С. 450–470.
7. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash // Earth-Science Reviews. – 2015. – Vol. 141. – С. 105–121.
8. Sharonova O., Anshits N., Fedorchak M., Zhizhaev A., Anshits A. Characterization of ferrospheres recovered from high-calcium fly ash // Energy & Fuels. – 2015. – Vol. 29. – С. 5404–5414.
9. Bhatt A., Priyadarshini S., Mohanakrishnan A.A. и др. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: a global review // Case Studies in Construction Materials. – 2019. – Vol. 11. – e00263.
10. Global waste distribution data: <https://bit.ly/3SgGY8s>
11. Ohenoja K., Pesonen J., Yliniemi J., Illikainen M. Utilization of fly ashes from fluidized bed combustion: a review // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – №7. – С. 2988.
12. Fuller A., Maier J., Karampinis E., Kalivodova J., Grammelis P., Kakaras E., Scheffknecht G. Fly ash formation and characteristics from (co-)combustion of an herbaceous biomass and a Greek lignite in a pulverized fuel pilot-scale test facility // Energies. – 2018. – Vol. 11. – №6. – С. 1581.
13. Wei Q., Song W. Mineralogical and chemical characteristics of coal ashes from two high-sulfur coal-fired power plants in Wuhai, Inner Mongolia, China // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – №4. – С. 323.
14. Rodrigues P., Silvestre J.D., Flores-Colen I., Viegas C.A., Ahmed H.H., Kurda R., de Brito J. Evaluation of the ecotoxicological potential of fly ash and



recycled concrete aggregates use in concrete // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – №1. – С. 351.

15. Dyer A. Zeolites // *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* / под ред. К.Н. Buschow и др. – Elsevier, 2001. – С. 9859–9863.

16. Берман И.Ф., Кельцев Н.В., Смола В.И., Гузиев И.С., Михайлов А.С. Адсорбционные свойства природных цеолитов по двуокиси серы // *Природные цеолиты*. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 56–62.

17. Bekkum V.H., Flanigen E.M., Jacobs P.A., Jansen J.C. *Introduction to Zeolite Science*. – Amsterdam: Elsevier, 1991. – 442 с.

18. Ye Y., Zeng X., Qian W., Wang M. Synthesis of pure zeolites from supersaturated silicon and aluminum alkali extracts from fused coal fly ash // *Fuel*. – 2008. – Vol. 87. – С. 1880–1886.

19. Moshoeshe M., Nadiye-Tabbiruka M.S., Obuseng V. A review of the chemistry, structure, properties and applications of zeolites // *American Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 7. – №5. – С. 196–221.

20. Markovska I. Synthetic zeolites – structure, classification, current trends in zeolite synthesis review // *Int. Science Conference*. – 2009. – June 4–5. – Stara Zagora, Bulgaria.

21. Tarmale B.G., Lokhande R.S., Naik S.R. Zeolite from blended coal fly ash: synthesis, characterization and application in industrial wastewater treatment // *Int. Journal of Chemical and Physical Sciences*. – 2015. – Vol. 4. – С. 21–30.

22. Treacy M.M.J., Higgins J.B. *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*. – 5-е изд. – International Zeolite Association, 2007. – 392



# СЕРТИФИКАТ

подтверждает, что

Фейсенов Ш., Репев М., Анарыз Н., Кажимуратов А., Жылыдаев К., Байсейітов А.С.

принял (-а) участие в Международной научно-практической конференции  
**«УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ,  
 РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ЭНЕРГОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
 В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

посвященной 85-летию со дня рождения академика НАН ВШ, заслуженного деятеля РК,  
 профессора, доктора технических наук Луганова Владимира Алексеевича



Горно-металлургического  
 имени О.А. Байконурова  
 Рысбеков К.Б