

Получение синтетического цеолита и нанокompозита из рисовой шелухи для удаления ионов ртути из воды

М. Сулейменова^{1,2}, С. Жарылкан^{1,2},
М. Мекенова^{1,2}, А. Толепова²,
А. Мутушев^{1,2}, С. Азат^{1,2}, Ж. Тауанов^{1,2*}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²ТОО Научный Производственно-Технический Центр «Жалын», г. Алматы, Казахстан

*E-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

В статье приведены результаты разработки новых композитных материалов, полученных из золы рисовой шелухи (ЗРШ). Композитные материалы связаны 2 мас.% наночастиц серебра и охарактеризованы с применением методов определения их структурных характеристик, а именно: рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), сканирующей электронной микроскопии с элементами полуколичественного анализа (SEM-EDS), низкотемпературной адсорбции азота (по теории Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и рентгенофазового анализа (XRD). По результатам элементного полуколичественного анализа было успешное модифицирование цеолита наночастицами серебра, который при соосаждении составил 1,44 %. В рентгеновском дифрактометре (XRD) определили минералогические фазы и подтвердили выраженную кристаллическую структуру синтетического цеолита вида «анальцим» и наночастицы серебра. Была проведена структурная модификация синтетического цеолита «анальцим» на основе ЗРШ в целях быстрого связывания цеолита с ртутью. Результаты БЭТ показали образование мезопор и микропор, при этом, площадь поверхности синтетического цеолита и модифицированного наночастицами серебра (AgNPs) составила 48,94 м²/г и 0,75 м²/г соответственно. Предварительные результаты показали удаление ионов ртути из раствора, что составило от 20 до 50% от начальной концентрации.

Ключевые слова: рисовая шелуха; адсорбция; ртуть; синтетический цеолит; нанокompозит.

Суды сынап иондарын тазалауға арналған синтетикалық цеолит пен нанокompозитті күріш қауызынан алу

М. Сулейменова^{1,2}, С. Жарылқан^{1,2},
М. Мекенова^{1,2}, А. Толепова²,
А. Мутушев^{1,2}, С. Азат^{1,2}, Ж. Тауанов^{1,2*}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²ЖШС Ғылыми өндірістік-техникалық орталық «Жалын», Алматы қ., Қазақстан

*E-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

Мақалада күріш қауызы күлінен (КҚК) алынған жаңа композициялық материалдарды әзірлеу нәтижелері берілген. Композиттік материалдар 2 мас.% күміс нанобөлшектерімен байланысқан және олардың құрылымдық сипаттамаларын анықтау әдістерімен сипатталады, атап айтқанда: рентгендік флуоресценттік талдау (XRF), жартылай сандық талдау элементтері бар сканерлеуші электронды микроскопия (SEM-EDS), төмен температурадағы азоттың адсорбциясы (Брунауэр-Эммет-Теллер теориясы бойынша (БЭТ) және рентгендік фазалық талдау (XRD). Элементтік жартылай сандық талдау нәтижелері бойынша цеолитті күміс нанобөлшектерімен модификациялау болды, ол бірге отырғызылған кезде 1,44% құрады. Рентгендік дифрактометрде (XRD) минералогиялық фазалар анықталды және синтетикалық цеолиттің «анальцим» және күміс нанобөлшектерінің айқын кристалдық құрылымын растады. КҚК негізіндегі синтетикалық цеолиттерді пайдалану кезінде сынаппен тез байланыстыру үшін құрылымдық модификация жүргізілді. БЭТ нәтижелері бойынша мезокеуектер мен микрокеуектер түзілуін көрсетті, синтетикалық цеолит пен нанобөлшектермен модификацияланған күмістің (AgNPs) бетінің ауданы сәйкесінше 48,94 м²/г және 0,75 м²/г құрады. Нәтижелер бойынша ерітіндіден сынап иондарының жойылуы бастапқы концентрацияның 20-50% құрады.

Түйін сөздер: күріш қауызы; адсорбция; сынап; синтетикалық цеолит; нанокompозит.

Obtaining synthetic zeolite and nanocomposite from rice husk to remove mercury ions from water

M. Suleimenova^{1,2}, S. Zharylkan^{1,2},
M. Mekenova^{1,2}, A. Tolepova²,
A. Mutushev^{1,2}, S. Azat^{1,2}, Zh. Tauanov^{1,2*}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²LLP Scientific Production Technical Center "Zhalyn", Almaty, Kazakhstan

*E-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

The article presents the results of the development of new composite materials obtained from rice husk ash (ZRH). Composite materials are bound by 2 wt.% silver nanoparticles and characterized using methods for determining their structural characteristics, namely: X-ray fluorescence analysis (XRF), scanning electron microscopy with elements of semi-quantitative analysis (SEM-EDS), low-temperature nitrogen adsorption (according to the theory of Brunauer-Emmett-Teller (BET) and X-ray phase analysis (XRD). According to the results of the elemental semi-quantitative analysis, the zeolite was successfully modified with silver nanoparticles, which at co-deposition amounted to 1.44%. Mineralogical phases were determined in an X-ray diffractometer (XRD) and the pronounced crystal structure of synthetic zeolite of the form "analcim" and silver nanoparticles was confirmed. A structural modification of synthetic zeolite "analcime" based on ZRH was carried out in order to quickly bind zeolite with mercury. The BET results showed the formation of mesopores and micropores, while the surface area of synthetic zeolite and modified silver nanoparticles (AgNPs) was 48.94 m²/g and 0.75 m²/g, respectively. Preliminary results showed that the removal of mercury ions from the solution was from 20 to 50% of the initial concentration.

Keywords: rice husk; adsorption; mercury; synthetic zeolite; nanocomposite.



Получение синтетического цеолита и нанокompозита из рисовой шелухи для удаления ионов ртути из воды

М. Сулейменова^{1,2} , С. Жарылкан^{1,2} , М. Мекенова², А. Толепова²,
А. Мутушев^{1,2} , С. Азат^{1,2} , Ж. Тауанов^{1,2*}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан

²ТОО Научный Производственно-Технический Центр «Жалын», ул. Павлодарская, 11, 050014, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

1. Введение

К промышленным синтетическим отходам относятся уголь [1], стальной шлак [2], зола биомассы и другие. Они содержат оксиды металлов и потенциально могут быть использованы в качестве сырья для синтеза цеолитов из-за присутствия алюмосиликатных и силикатных фаз в таких отходах [3,4].

Рисовая шелуха является наиболее распространенным доступным биоресурсом и представляет собой твердый слой, защищающий зерно, состоящий из аморфного кремнезема; из-за высокого содержания кремнезема она используется в качестве органического удобрения для внесения в почву при недостатке питательных веществ [5]. Большая часть рисовой шелухи, полученной после сбора урожая, используется в качестве топлива в котлах благодаря фиксированному процентному содержанию углерода от 10 до 15%. Зола, полученная таким образом после удаления целлюлозы и летучих веществ, на 90% состоит из кремнезема [6]. Высококачественные нанопористые материалы и цеолиты могут быть синтезированы в присутствии органических матриц из золы рисовой шелухи низкой ценности в качестве устойчивого источника кремнезема [7-9].

Синтетические цеолиты имеют широкий спектр применения в различных областях, таких как моющие средства, очистка воды, разделение газов, катализ и др. Синтетические цеолиты чаще используются в коммерческих целях, чем природные цеолиты, из-за чистоты кристаллических продуктов и однородности размеров частиц. Одним из главных преимуществ

использования цеолита является его кристаллизованный каркас, полученный в виде комбинации алюмосиликата. Цеолиты представляют собой гидратированный алюмосиликат, который получают из тетраэдрического оксида алюминия $[AlO_4]^{5-}$ и кремнезема $[SiO_4]^{4-}$ путем взаимодействия атомов кислорода [10,11].

Было обнаружено, что синтетические алюмосиликаты обладают отличительным свойством поглощать и надежно удерживать различные ионы металлов и наночастицы металлов в своей структуре. Это уникальное свойство синтетических алюмосиликатов открывает многообещающие возможности для создания практических нанокompозитных сорбентов с ценными свойствами [12]. Химический и структурный состав цеолита играет решающую роль в определении качества адсорбции и скорости катионного обмена. С помощью различных химических обработок можно модифицировать химический и структурный состав цеолитов для улучшения их гидрофильности или гидрофобности, обеспечивая ионную или органическую адсорбцию с большей эффективностью [13]. Чтобы максимально использовать потенциал синтетических цеолитов для многочисленных перспективных применений, крайне важно целенаправленно разрабатывать новые материалы с контролируемыми свойствами.

Модификация синтетических цеолитов наночастицами серебра (AgNPs) позволяет улучшить каталитические и адсорбционные свойства. Модифицированный синтетический цеолит может быть использован для очистки воды и воздуха от различных загрязнителей, таких как токсические, тяжелые металлы [14,15].

Загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами, включая ртуть (Hg^{2+}), является серьезной проблемой для экологии и здоровья людей. Ртуть считается одним из наиболее опасных тяжелых металлов, поскольку она ядовита, накапливается в пищевой цепи и может вызывать серьезные проблемы для живых организмов, включая людей [14].

Важнейшей задачей в процессе получения композитных сорбентов является синтез высокоэффективного материала с высокой адсорбционной способностью, селективностью, быстрой кинетикой и возможностью повторного использования.

В данной работе была использована коммерческая рисовая шелуха (Балхашский р-н, с. Баканас) для получения синтетического цеолита с помощью щелочной гидротермальной обработки. Синтетический цеолит был модифицирован пропиткой серебром (AgNPs) для повышения сродства к наночастицам ртути для улучшения разделения с помощью методов ионообмена и совместного осаждения с последующим восстановлением в пористой структуре. Материалы были охарактеризованы с помощью передовых методов определения цеолитной фазы, морфологии их поверхности, химического состава. Способность полученных синтетических нанокompозитов удалять ионы ртути из воды была изучена методом адсорбции с построением кинетических кривых.

2. Эксперимент

2.1 Материалы и методы

Применяемые в исследовании образцы рисовой шелухи были собраны в Алматинской области (Балхашского р-на, с. Баканас), Казахстан. Для экспериментов были использованы химические реагенты производства Sigma-Aldrich (Сент-Луис, Миссури, США) NaOH (99,0%); NaAlO_2 (99,0%); HgCl_2 (99,0%); AgNO_3 (99,9%), NaBH_4 (98,0%), концентрированная соляная кислота (HCl), концентрированная азотная кислота (HNO_3) (Россия, ТОО «Лабхимпром»). Борогидрид натрия был применен для восстановления ионов серебра до наночастиц серебра на поверхности нанокompозитов.

Анализ минералогического состава образцов проводили методом рентгенофазового анализа (XRD) с использованием дифракционной системы MPD XCEL-221 при 30 кВ и 10 мА, излучением $\text{CuK}\alpha$.

Удельную поверхность рассчитывали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Распределение пор по размерам, площадь поверхности и объем пор были оценены с использованием аппарата Сорбтометр М.

Морфологические характеристики поверхности цеолитов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) с применением сканирующего электронного микроскопа TM4000, элементный анализ выполняли с использованием энергодисперсионного рентгеновского спектрометра Si(Li) (Hitachi, Tokyo, Japan),

подключенного к SEM. Химический состав синтетических и модифицированных цеолитов изучали методом рентгенофлуоресценции (XRF) на ФОКУС-2М.

Концентрации ионов ртути в растворах были изучены с применением ртутного анализатора RA-915M (Санкт-Петербург, Россия) с насадкой для пиролиза (PYRO-915+).

2.2 Получение синтетического цеолита

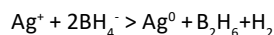
В качестве сырья для синтеза диоксида кремния (SiO_2) рисовая шелуха предварительно промывается водой, затем обрабатывается 2 М раствором HCl для очистки сырья от посторонних веществ и высушивается при 90°C в течение 2 ч в сушильном шкафу (ШС-80-01 СПУ). После высушивания рисовая шелуха сжигается при 600°C в течение 4 ч в муфельной печи (SNOL 8,2/1100 LSM) для удаления органических соединений. После сжигания образуется зола из рисовой шелухи (ЗРШ), к которой добавляется 100 мл 2 М NaOH и смесь непрерывно перемешивается в магнитной мешалке при 90°C в течение 2 ч для преобразования твердого кремнезема в водорастворимый силикат натрия. После полученный водорастворимый раствор силиката натрия фильтруется, затем добавляется концентрированная HCl , и раствор переходит в нерастворимую кремниевую кислоту. Полученный чистый SiO_2 промывается дистиллированной водой до $\text{pH}=7$ и помещается в сушильный шкаф при 105°C до полного высыхания.

Синтез цеолита из рисовой шелухи (ЦРШ) осуществляют путем гидротермальной обработки. Для начала 12 г NaAlO_2 , 22,5 г NaOH и 76 мл питьевой воды смешивается до полного растворения. Затем к этой смеси медленно добавляется 38 г полученного SiO_2 . Готовая смесь помещается в автоклавный реактор с внешней оболочкой из нержавеющей стали и внутренним контейнером из политетрафторэтилена емкостью 180 мл. Эти реакторы помещаются в печь для образования цеолита в течение 24 ч при 150°C . После этого реактор охлаждается, смесь фильтруется и промывается дистиллированной водой. Затем синтезированный образец цеолита высушивается в сушильном шкафу при 100°C в течение 12 ч.

2.3 Синтез нанокompозита

Свежеприготовленный цеолит пропитывается наночастицами серебра (AgNPs) с помощью реакции ионного обмена и восстановления. Проводится обычная реакция ионообмена путем добавления 20 мл водного раствора AgNO_3 на 1 г цеолита и оставляется для замачивания на 12 ч. Реакционный контейнер накрывается алюминиевой фольгой и хранится в темном месте, чтобы предотвратить окисление ионов серебра. Ионообменная суспензия высушивается при 120°C в течение 3 ч. Процедура замачивания повторяется дважды для получения цеолитов с ионообменом серебра (ЦРШ-AgNPs), содержащих приблизительно 2 мас.% AgNPs. Полученный ЦРШ-AgNPs

сжигается в течении 3 ч при 500°C. Затем продолжается 4-часовая реакция восстановления ионов серебра с помощью борогидрида натрия (NaBH_4) в качестве восстановителя. Таким образом получается нанокомпозит с нагрузкой AgNPs (ЦРШ-AgNPs) [14,16].



2.4 Адсорбция ионов ртути

Для адсорбции ионов ртути синтезированными образцами приготовлены растворы HgCl_2 с исходной концентрацией ионов ртути 10 мг/л и дозировкой адсорбента 0,1 г в 40 мл раствора. Значение pH начальных растворов доведены до 2 с помощью концентрированной HNO_3 для избежания образования других нерастворимых форм ртути (рисунок 1), чтобы избежать образования других нерастворимых форм ртути, раствор HgCl_2 может быть сделан более кислотным (pH ниже 4,5). Низкий pH помогает поддерживать ионы ртути в растворе, поскольку при более низком pH меньше ионов Hg^{2+} будет превращаться в нерастворимые формы, такие как гидроксид ртути (Hg(OH)_2). Значение pH исходных растворов было около 6,5. Эксперименты проводятся при комнатной температуре в статических условиях. Из адсорбционных контейнеров в течение 24 ч отбираются аликвоты объемом 15 мкл для измерения остаточной концентрации ртути на ртутном анализаторе до достижения равновесия. Все полученные данные строились с использованием вариационного анализа с применением программы MS Excel и программным обеспечением Medusa.

Процент удаления ртути рассчитывается по формуле:

$$R = (C_0 - C_f) \times 100 \% / C_0 \quad (1)$$

Количество удаленной ртути рассчитывалось, исходя из разницы между начальной и остаточной концентрациями:

$$Q_{eq} = ((C_0 - C_f) \times V) / m \quad (2)$$

где R – процент удаления ртути (%), Q_{eq} – содержание ртути в материале (мг/г), C_0 и C_f – концентрация ртути (мг/л) в исходном и конечном растворах соответственно, V – объем раствора (л), m – начальный вес цеолита (г).

На рисунке 1 показано теоретическое видообразование 10 мг/л раствора Hg^{2+} (0,05 ммоль Hg^{2+} , 0,1 ммоль Cl^-), построенное с использованием программного обеспечения Medusa. Данные видообразования показывают стабильность ионов ртути в кислой среде, поэтому для адсорбции ионов ртути использовался pH 2.

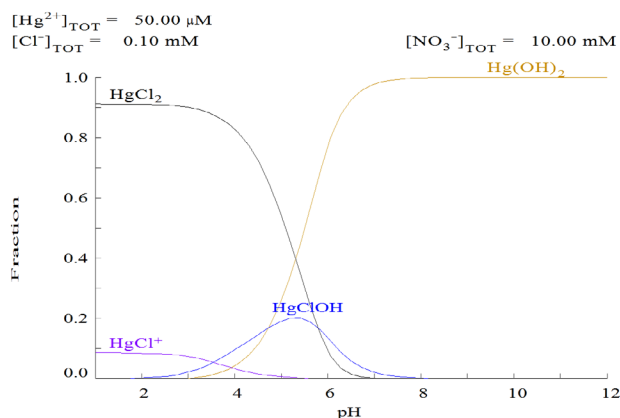


Рисунок 1 – Видообразование 10 мг/л раствора Hg^{2+} [14]

3. Результаты и обсуждение

3.1 Рентгенофазовый анализ (XRD)

Синтетические цеолиты, полученные из золы рисовой шелухи, были исследованы на рентгеновском дифрактометре для определения минералогической фазы и подтверждения получения кристаллической структуры. На рисунке 2 показаны результаты синтеза цеолита методом гидротермальной обработки, при температуре 150°C. Согласно результатам, полученный синтетический цеолит и нанокомпозит (ЦРШ-AgNPs) имеют выраженную кристаллическую структуру анальцима с химической формулой $\text{Na[AlSi}_2\text{O}_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$. Полученные материалы показали четкие пики, которые согласовываются с литературными данными [17].

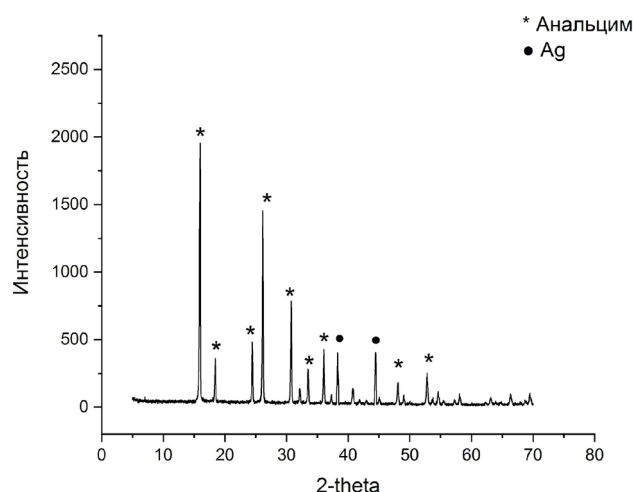


Рисунок 2 – Дифрактограмма синтетического цеолита и ЦРШ-AgNPs [17]

3.2 Низкотемпературная адсорбция азота

Результаты, полученные методом БЕТ, показали, что синтетический цеолит из рисовой шелухи имеет небольшую площадь удельной поверхности и объем пор (таблица 1). Синтез синтетического цеолита с кристаллической структурой прошел успешно, о чем свидетельствует образование мезопор и микропор, что привело к увеличению объема пор и площади поверхности, которая составила 48,94 м²/г. В модифицированном наночастицами серебра нанокompозите (ЦРШ-AgNPs) наблюдалось уменьшение объема пор и площади поверхности до 0,75 м²/г. Monique и др. [18] получали содалит из угольной золы-уноса с удельной поверхностью 9,7 м²/г, а Sanchez-Hernandez и др. [19] сообщали об образовании анальцима и содалита из алюминиевого шлака с удельной поверхностью 4,6 и 15,5 м²/г соответственно. Также было высказано предположение,

что наночастицы Ag⁰ могут блокировать отверстия пор, тем самым делая его микропоры недоступными для проникновения молекул N₂. Следовательно, эти факторы могут способствовать низким значениям удельной поверхности, полученным авторами.

3.3 Сканирующая электронная микроскопия с элементным анализом (SEM-EDS)

Результаты SEM-EDS полученных цеолитов показаны на рисунке 3. Результаты элементного анализа методом EDS показали успешное модифицирование цеолита наночастицами серебра. Среднее процентное содержание наночастиц серебра в структуре синтетического цеолита после реакции соосаждения составила (1,440±0,56) % для композита ЦРШ-AgNPs. Композит ЦРШ-AgNPs имеет атомное соотношение Al:Si = 1:2, что соответствует цеолиту [20].

Таблица 1 – Площадь удельной поверхности адсорбентов низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ)

Вид техногенного отхода	Тип адсорбента (цеолита)	S _{уд.п.} , м ² /г	Литература
РШ	Анальцим	48,94	Данные авторов
РШ	ЦРШ-AgNPs (нанокompозит)	0,75	Данные авторов
Золы уноса	Содалит	9,70	[18]
Алюминиевый шлак	Содалит	15,50	[19]
Алюминиевый шлак	Анальцим	4,60	[19]

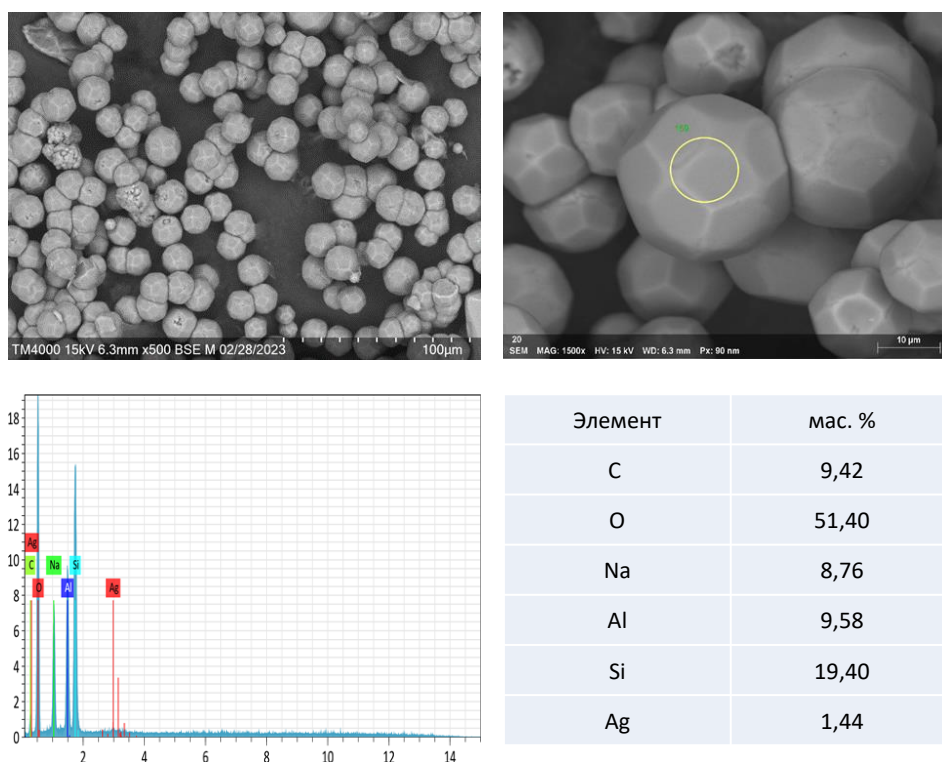


Рисунок 3 – Микрофотографии синтетических цеолитов анальцима на SEM и элементный анализ EDS

3.4 Рентгенофлуоресцентный анализ (XRF)

Элементный состав исходной ЦРШ-AgNPs, полученный методом XRF, представлен в таблице 2. Содержание всех элементов представлено в %. По результатам, ЦРШ-AgNPs содержание Ag в структуре составляет 12,61%. По сравнению с теоретическими данными рентгенофлуоресцентный анализ показывает больший процент Ag в структуре цеолита, что может быть связано со скоплением большей концентрации серебра в одном месте анализа. Композит ЦРШ-AgNPs имеет атомное соотношение Al:Si = 1:1,7. По анализам SEM-EDS и XRF атомное соотношение Al:Si соответствует литературным данным [20] (Al:Si = 1:(1,5-2)).

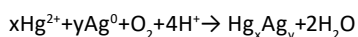
Таблица 2 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа синтетического цеолита с модификацией Ag NPs

Элемент	Концентрация, мас. %
Fe	0,74
Si	53,97
Al	32,65
Ca	0,02
Ag	12,61

3.5 Эксперименты по удалению ртути из модельных растворов

Полученная кинетика адсорбции представлена на рисунке 4. Изучение кинетики адсорбции ионов ртути из водных растворов с использованием полученных синтетических цеолитов показало самое низкое значение для ЦРШ. Данный цеолит показал наименьшее адсорбционное удаление 20,03% в течение 24 ч. ЦРШ-AgNPs удалил 51,01% ионов ртути в течение 24 ч, что в 2 раза выше, чем ЦРШ.

Полученные данные показывают присутствие разных типов адсорбции, характерных для ЦРШ и ЦРШ-AgNPs. Для ЦРШ-AgNPs характерно быстрое удаление ионов ртути за счет химической и физической адсорбции. Для ЦРШ, с более пористой структурой характерна физическая адсорбция, что приводит к медленной адсорбции ионов ртути (Hg^{2+}). По полученным результатам можно предположить следующий механизм реакции между ионами AgNPs и Hg^{2+} :



Максимальная адсорбционная способность синтетического цеолита ЦРШ составляет около 0,8 мг/г. После модификации наночастицами серебра адсорбционная способность ЦРШ-AgNPs увеличивается в 3,5 раза и достигает 2,8 мг/г. Результаты показывают, что серебро-

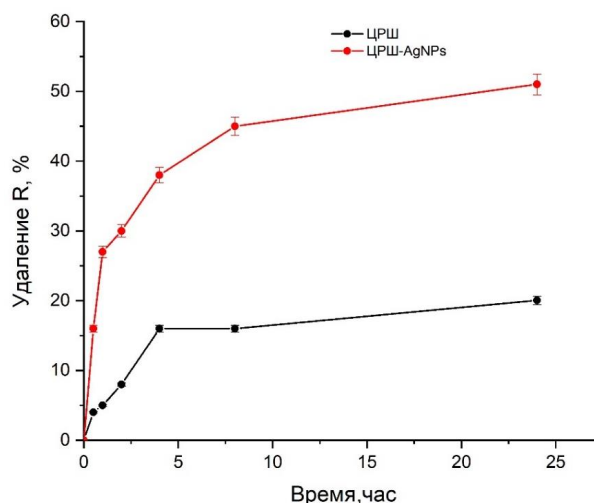


Рисунок 4 – Кинетика удаления ионов ртути Hg^{2+} из модельных растворов

содержащий композит обладает гораздо более высокой адсорбционной способностью, чем синтетический цеолит, что обусловлено разницей в механизме удаления, как указано выше. Эти результаты подтверждают возможность внутренней модификации цеолита наночастицами AgNPs для повышения эффективности удаления ионов ртути (Hg^{2+}) из воды.

4. Заключение

В данной работе была разработана методика получения пористого синтетического цеолита (анальцим) на основе рисовой шелухи для удаления ионов ртути из воды. Пористый синтетический цеолит, полученный из золы рисовой шелухи, был модифицирован наночастицами серебра, что привело к существенному улучшению адсорбционной способности извлечения ионов ртути. Использование оптимизированного метода с модификацией наночастицами серебра привело к усилению адсорбции, более быстрому ионообмену через поры на поверхности цеолита, а также получению новых композитных материалов для удаления ионов ртути.

По предварительным результатам образец ЦРШ-AgNPs показал значительно высокий процент адсорбции ртути из раствора по сравнению с синтетическим цеолитом из рисовой шелухи. Образец ЦРШ-AgNPs удалил более 51,01% (2,8 мг/г) ионов ртути, тогда как исходный ЦРШ удалил только 20,03% (0,8 мг/г).

Был разработан синтетический цеолит на основе рисовой шелухи с модификацией поверхности наночастицами серебра AgNPs. Это способствовало усиленному удалению ионов ртути в водной среде в определенных условиях эксперимента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP09058268, «Разработка метода получения синтетических цеолитов и нанокompозитов для удаления ртути и катионных красителей из воды»).

Литература

- 1 A. Iqbal, H. Sattar, R. Haider, S. Munir. Synthesis and characterization of pure phase zeolite 4A from coal fly ash // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 219. – P. 258–267.
- 2 P.P. Das, A. Anweshan, M.K. Purkait. Treatment of cold rolling mill (CRM) effluent of steel industry // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 274. – P.119093.
- 3 N.S. Samanta, P.P. Das, P. Mondal, M. Changmai, M.K. Purkait. Critical review on the synthesis and advancement of industrial and biomass waste-based zeolites and their applications in gas adsorption and biomedical studies // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2022. – Vol. 99. – P.100761.
- 4 T. Fukasawa, A. Horigome, T. Tsu, A.D. Karisma, N. Maeda, A.N. Huang, K. Fukui. Utilization of incineration fly ash from biomass power plants for zeolite synthesis from coal fly ash by hydrothermal treatment // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – Vol. 167. – P.92–98.
- 5 V.B. Carmona, R.M. Oliveira, W.T.L. Silva, L.H.C. Mattoso, J.M. Marconcini. Nanosilica from rice husk: Extraction and characterization // *Industrial Crops and Products* – 2013. – Vol. 43. – P.291–296.
- 6 S. Banerjee, S. Barman, G. Halder. Sorptive elucidation of rice husk ash derived synthetic zeolite towards deionization of coalmine waste water: A comparative study // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2017. – Vol. 5. – P.137–151.
- 7 C. Belviso. State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – P. 1–27.
- 8 C. Gomes, H. Schneider, J. Silveira, L. Bonan, N. Romeu, P. Juarez. Synthesis of potassium zeolite from rice husk ash as a silicon source // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 4. – P.100201.
- 9 A. Khaleque, M. Alam, M. Hoque, S. Mondal, J. Bin, B. Xu, M.A.H. Johir, A. Krishna, J.L. Zhou, M. Boshir, M. Ali. Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review // *Environmental Advances*. – 2020. – Vol. 2. – P.100019.
- 10 T. Derbe, S. Temesgen, M. Bitew. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – P.17.
- 11 X. Zeng, X. Hu, H. Song, G. Xia, Z.Y. Shen, R. Yu, M. Moskovits. Microwave synthesis of zeolites and their related applications // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2021. – Vol. 323. – P.111262.
- 12 J. Wen, H. Dong, G. Zeng. Application of zeolite in removing salinity/sodicity from wastewater: A review of mechanisms, challenges and opportunities // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol.197. – P.1435–1446.
- 13 L. Roshanfekr Rad, M. Anbia, Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: A review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – P.106088.
- 14 Z. Tauanov, P.E. Tsakiridis, S. V. Mikhlovsky, V.J. Inglezakis, Synthetic coal fly ash-derived zeolites doped with silver nanoparticles for mercury (II) removal from water // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – Vol. 224. – P.164–171.
- 15 E. Sumesh, M.S. Bootharaju, Anshup, T. Pradeep. A practical silver nanoparticle-based adsorbent for the removal of Hg²⁺ from water // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Vol. 189. – P.450–457.
- 16 Z. Tauanov, J. Lee, V.J. Inglezakis. Mercury reduction and chemisorption on the surface of synthetic zeolite silver nanocomposites: Equilibrium studies and mechanisms // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – Vol. 305. – P.112825.
- 17 D. Güngör, S. Özen, Development and characterization of clinoptilolite-, mordenite-, and analcime-based geopolymers: A comparative study, *Case Studies in Construction Materials*. – 2021. – Vol. 15. – P.e00576.
- 18 M.C. Monique, L.V. Lacerda, A.K. Alves, C.P. Bergmann. Biodiesel production using coal fly ash-derived sodalite as a heterogeneous catalyst // *Fuel*. – 2017. – Vol. 190. – P.268–273.
- 19 R. Sánchez-hernández, A. López-delgado, I. Padilla, R. Galindo, S. López-andrés. One-step synthesis of NaP1, SOD and ANA from a hazardous aluminum solid waste // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2016. – Vol. 226. – P.266–277.
- 20 I. El Bojaddayni, M. Emin Küçük, Y. El Ouardi, I. Jilal, S. El Barkany, K. Moradi, E. Repo, K. Laatikainen, A. Ouammou. A review on synthesis of zeolites from natural clay resources and waste ash: Recent approaches and progress // *Minerals Engineering*. – 2023. – Vol. 198. – P.108086.

References

- 1 Iqbal A, Sattar H, Haider R, Munir S (2019) *J Clean Prod* 219:258–267. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.066>
- 2 Das PP, Anweshan A, Purkait MK (2021) *Sep Purif Technol* 274:119093. <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119083>
- 3 Samanta NS, Das PP, Mondal P, Changmai M, Purkait MK (2022) *Journal of the Indian Chemical Society* 99:100761. <http://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100761>
- 4 Fukasawa T, Horigome A, Tsu T, Karisma AD, Maeda N, Huang AN, et al. (2017) *Fuel Processing Technology* 167:92–98. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.023>
- 5 Carmona VB, Oliveira RM, Silva WTL, Mattoso LHC, Marconcini JM (2013) *Ind Crops Prod* 43:291–296. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.050>
- 6 Banerjee S, Barman S, Halder G (2017) *Groundw Sustain Dev* 5:137–151. <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.06.004>

- 7 Belviso C (2017) *Prog Energy Combust Sci* 000:1–27. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.004>
- 8 Gomes C, Schneider H, Silveira J, Bonan L, Romeu N, Juarez P (2021) *Clean Eng Technol* 4:100201. <http://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100201>
- 9 Khaleque A, Alam M, Hoque M, Mondal S, Bin J, Xu B, et al. (2020) *Environmental Advances* 2:100019. <http://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>
- 10 Derbe T, Temesgen S, Bitew M (2021) *Advances in Materials Science and Engineering* 2021:17. <http://doi.org/10.1155/2021/6637898>
- 11 Zeng X, Hu X, Song H, Xia G, Shen ZY, Yu R, et al. (2021) *Microporous and Mesoporous Materials* 323:111262. <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111262>
- 12 Wen J, Dong H, Zeng G (2018) *J Clean Prod* 197:1435–1446. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.270>
- 13 Roshanfekar Rad L, Anbia M (2021) *J Environ Chem Eng* 9:106088. <http://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106088>
- 14 Tauanov Z, Tsakiridis PE, Mikhlovsky S V., Inglezakis VJ (2018) *J Environ Manage* 224:164–171. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.049>
- 15 Sumesh E, Bootharaju MS, Anshup, Pradeep T (2011) *J Hazard Mater* 189:450–457. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.061>
- 16 Tauanov Z, Lee J, Inglezakis VJ (2020) *J Mol Liq* 305:112825. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112825>
- 17 Güngör D, Özen S (2021) *Case Studies in Construction Materials* 15:e00576. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00576>
- 18 Monique MC, Lacerda LV, Alves AK, Bergmann CP (2017) *Fuel* 190:268–273. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.016>
- 19 Sánchez-hernández R, López-delgado A, Padilla I, Galindo R, López-andrés S (2016) *Microporous and Mesoporous Materials* 226:266–277. <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.01.037>
- 20 El Bojaddayni I, Emin Küçük M, El Ouardi Y, Jilal I, El Barkany S, Moradi K, et al. (2023) *Miner Eng* 198:108086. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108086>