

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Қалымбет Арайлым Қайролдақызы, на тему:
«Исследование свойств и разработка технологии получения сорбционно-
фильтрующих материалов из отечественного сырья»,
представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по
образовательной программе 8D07109 – Инновационные технологии и новые
неорганические материалы.

Актуальность темы исследования.

Загрязнение водных ресурсов ионами тяжёлых металлов, в частности меди, остаётся одной из наиболее актуальных экологических проблем, связанных с промышленным развитием. Ионы Cu^{2+} широко присутствуют в сточных водах горнодобывающей и металлургической промышленности и характеризуются токсичностью, устойчивостью и способностью к биоаккумуляции. Традиционные методы очистки часто ограничены высокой стоимостью, недостаточной стабильностью и сниженной эффективностью в реальных условиях.

В многостадийных системах очистки воды особое значение имеет стадия доочистки (полирующей очистки), на которой сорбционные материалы должны обеспечивать структурную стабильность, низкую растворимость, высокую механическую прочность и надёжную работу в условиях динамической фильтрации.

В Казахстане образуются значительные объёмы отходов добычи и обогащения полезных ископаемых, содержащих силикатные и алюмосиликатные фазы, пригодные для синтеза функциональных сорбентов. Их использование позволяет разрабатывать экономически эффективные материалы и соответствует принципам устойчивого развития и циркулярной экономики.

Объект исследования.

Силикофосфатные сорбционно-фильтрующие материалы, синтезированные из отходов обогащения руд отечественных месторождений Казахстана.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является исследование физико-химических свойств и разработка технологии получения структурно устойчивых силикофосфатных сорбционно-фильтрующих материалов из отходов обогащения руд отечественных месторождений, а также оценка их эффективности при удалении ионов Cu^{2+} в равновесных, кинетических и динамических условиях.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

– охарактеризовать исходное сырьё и оценить его пригодность в качестве прекурсора;

- синтезировать силикофосфатные материалы методом ортофосфорнокислотной модификации (20–35 мас.% H_3PO_4) с последующей термической обработкой (400–800°C);
- исследовать структурные и поверхностные свойства, растворимость в воде и механическую прочность полученных материалов;
- изучить равновесные и кинетические характеристики сорбции;
- оценить динамические характеристики в условиях колонных (фильтрационных) систем;
- установить взаимосвязи между условиями синтеза, структурой и сорбционными свойствами;
- выполнить расчёт материального баланса разработанной технологии получения сорбционно-фильтрующих материалов.

Научная новизна:

- Впервые флотационные хвосты месторождения Акбакай обоснованы как эффективное исходное сырьё для получения силикофосфатных сорбентов на основе их минералогического состава и реакционной способности при кислотно-термической модификации.
- Впервые разработан способ синтеза силикофосфатных сорбентов и установлены оптимальные условия (600°C, 20 мас.% H_3PO_4), обеспечивающие повышенную структурную стабильность и функционализацию поверхности.
- Впервые комплексно исследовано равновесное, кинетическое и динамическое поведение силикофосфатных материалов при сорбции ионов Cu^{2+} , а также обоснован комбинированный механизм сорбции.
- Показано, что разработанный сорбент превосходит бентонит по эффективности и пригоден для доочистки медьсодержащих промышленных сточных вод.

Практическая значимость:

- разработана технология получения структурно устойчивых сорбционно-фильтрующих материалов из отечественного техногенного сырья;
- полученные силикофосфатные материалы характеризуются низкой растворимостью (~1%) и высокой механической прочностью (до 91%), что обеспечивает их стабильную работу в условиях фильтрации;
- разработанные сорбенты демонстрируют высокую эффективность удаления ионов Cu^{2+} (>97% в статических условиях и более 83% в динамических условиях) при остаточных концентрациях менее 0,2 мг/л;
- по сравнению с бентонитом, характеризующимся высокой дисперсностью и растворимостью (42–80%), разработанные материалы обладают повышенной структурной устойчивостью и надёжной работой в фильтрационных системах;
- несмотря на умеренную равновесную сорбционную ёмкость по сравнению с высокоразвитыми адсорбентами, сочетание физико-химической стабильности и доступной сырьевой базы делает разработанные сорбенты перспективными для полирующей очистки воды.

Методы исследования.

Синтез силикофосфатных материалов осуществлялся методом химической модификации ортофосфорной кислотой с последующей термической обработкой.

Структурные и физико-химические характеристики синтезированных материалов исследовали с использованием рентгенофазового анализа (XRD) на приборе DRON-3, электронно-зондового микроанализа (EPMA) на JEOL 733, инфракрасной спектроскопии (FTIR) на Bruker Alpha II, сканирующей электронной микроскопии (SEM) на JEOL JSM-6490LA, анализа удельной поверхности по методу БЭТ на приборе Veishide BSD 660, а также измерения дзета-потенциала с использованием Malvern Zetasizer Nano ZS90.

Сорбционные свойства исследованы в статических (равновесных и кинетических) и динамических (колонных) условиях с использованием методов периодической сорбции и непрерывной фильтрации через неподвижный слой сорбента. Определение концентрации ионов меди проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с ISO 8288:1986 на приборе Shimadzu AA-7000. Динамические исследования выполнялись с учетом положений ГОСТ 20255.2–89.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Кислотно-термическая модификация хвостов флотации руды месторождения Акбакай (67 масс.% SiO_2 , алюминатные и карбонатные фазы) с использованием 20%-ной H_3PO_4 при 600°C приводит к получению силикофосфатного материала, обладающего низкой растворимостью ($\sim 1\%$), высокой механической прочностью (91%), удельной поверхностью по ВЕТ $4,02 \text{ м}^2/\text{г}$ и высокоотрицательным поверхностным зарядом $\zeta = -20,1 \text{ мВ}$, что свидетельствует о структурной функционализации поверхности и повышенной сорбционной способности.

2. Синтезированный на основе хвостов флотации руды месторождения Акбакай силикофосфатный материал демонстрирует высокую эффективность удаления ионов Cu^{2+} ($>97\%$ при $1\text{--}40 \text{ мг/л}$) с максимальной равновесной ёмкостью $1,33 \text{ мг/г}$. Быстрая сорбция ($>98\%$ за 2 мин) и результаты кинетического моделирования ($R^2 = 1,000$) указывают на комбинированный механизм, включающий поверхностное комплексообразование, ионный обмен и электростатические взаимодействия.

3. Разработанный сорбент обеспечивает значительно более низкие остаточные концентрации ионов Cu^{2+} ($<0,2 \text{ мг/л}$ против $1\text{--}2 \text{ мг/л}$) в статических условиях, по сравнению с бентонитом маркой ТУ 2164-004-00204493-2009, что подтверждает его более высокую эффективность и перспективность для доочистки медьсодержащих промышленных сточных вод. Технология получения сорбента включает последовательные стадии кислотной обработки исходного сырья, термической активации и формирования фосфатсодержащей функционализированной структуры.

Связь с государственными программами.

Данная диссертация выполнена в рамках научно-исследовательских проектов, финансируемых национальными научными программами Республики Казахстан, направленными на рациональное использование

минеральных ресурсов, переработку отходов и охрану окружающей среды: №BR21881939 “Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационного инжинирингового центра” (2023-2025 гг) и №AP22685109 “Исследование свойств и разработка технологии получения сорбционно-фильтрующих материалов из отечественного сырья и их применение для очистки воды от тяжелых металлов” (2024-2026 гг).

Работа также соответствует ключевым стратегическим и нормативным документам Республики Казахстан, включая Концепцию перехода Республики Казахстан к «зеленой экономике» (Указ Президента РК №577 от 30 мая 2013 года), Экологический кодекс Республики Казахстан (№400-VI ЗРК от 2 января 2021 года), Государственную программу развития науки Республики Казахстан на 2023–2029 годы, а также Государственную программу управления водными ресурсами Республики Казахстан (до 2030 года).

Публикации.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 7 научных публикациях, включая 4 статьи в международных рецензируемых научных журналах, входящих в базу Scopus (Скопус); 1 статью в журнале, рекомендованном Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства Науки и Высшего Образования Республики Казахстан, и 2 публикации в материалах конференций.

Статьи в международных рецензируемых научных журналах, входящих в базу Scopus (Скопус):

1. Kalymbet A., Kubekova Sh., Lavrova S. Ore enrichment waste as raw material for heavy metal sorbents. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2025, Vol. 60, No. 4. <https://doi.org/10.59957/jctm.v60.i4.2025.14>

2. Kalymbet A., Kubekova Sh., Kapralova V., Lavrova S. From Gold Mining Waste to Functional Sorbents: Structural and Compositional Insights into Copper Adsorption Efficiency. *ES Materials and Manufacturing*, 2025, 30, 1777. <https://doi.org/10.30919/mm1777>

3. Kalymbet A., Kubekova Sh., Kapralova V., Rysbekov K., Lavrova S. Valorization of Manganese Ore Tailings from the Borly Deposit into Functional Sorbents. *Engineered Science*, 2025, 37, 1775. <https://doi.org/10.30919/es1775>,

4. Kalymbet A., Kubekova Sh., Kapralova V., Lavrova S. Feasibility Study into the Possibility of Manganese Ore Enrichment Waste Use for Sorbent Material Development. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2026, Vol. 61, No. 1. <https://doi.org/10.59957/jctm.v61.i1.2026.215>

Публикация в журнале, рекомендованном Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства Науки и Высшего Образования Республики Казахстан:

1. Kalymbet A., Kubekova Sh., Kapralova V. Comparative Study of a Silicophosphate Sorbent Based on Enrichment Wastes from the Akbakay Deposit and Bentonite in the Sorption of Copper Ions from Aqueous Solutions. *Mechanics and Technology / Scientific journal. Chemical Technologies Section*. 2026, No.1(91).

Публикации в материалах конференций:

1. Қалымбет А. Қ., Кубекова Ш.Н.. Изучение состава силикофосфатных сорбентов на основе техногенного сырья месторождения Ашиктас. *Труды Сампаевских чтений "Сампаевские Чтения - 2021"*. Том II. Алматы, 2021. 306-309 стр. ISBN 978-601-323-246-1.
2. Kalymbet A. Synthesis and Infrared Characterization of Silicophosphate Sorbents Based on Sulfide Gold Ore Waste from the Akbakay Deposit. *LXXI International Multidisciplinary Conference "Recent Scientific Investigation"*. Primedia E-launch LLC, Shawnee, USA, 2025, pp. 56-60. ISBN 978-1-64871-560-0.