

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:

**«КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОКСИДНОГО
ПРИРОДНОГО И СУЛЬФИДНОГО ТЕХНОГЕННОГО
ЦИНКСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАЛКИЯ»,
представленной на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07220 – «Металлургия»
МАХАНБЕТОВОЙ БАКТЫГУЛ АЛИМЖАНОВНЫ**

Цель работы.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование создания технологии комплексной переработки окисленных цинксодержащих руд месторождения Шалкия и хвостов обогащения сульфидной руды с одновременным получением кремнистых ферросплавов и цинковых возгонов с заменой стальной стружки на магнетитовый концентрат.

Задачи исследования

- выполнить термодинамическое моделирование взаимодействия сульфидов цинка, свинца, железа с углеродом и магнетитом с определением закономерностей получения ферросплавов и Zn-Pb возгонов;
- установить термодинамическим моделированием, сопряженным с рототабельным планированием второго порядка оптимальные технологические параметры равновесной степени извлечения кремния в сплав, цинка и свинца в возгоны, концентрацию элементов в продуктах при взаимодействии окисленной руды Шалкия, хвостов ее обогащения в смеси с сульфидной рудой присутствии углерода, железа, магнетита;
- создать математические модели на основании которых определить оптимальные технологические параметры (расход кокса, стальной стружки, магнетитового концентрата) получения электроплавкой из окисленной руды месторождения Шалкия, хвостов ее обогащения и их смесей марочного ферросилиция и извлечения цинка, свинца в возгоны;
- исследовать кинетику извлечения кремния в ферросплав при электроплавке окисленной руды Шалкия и хвостов обогащения;
- провести, укрупнено-лабораторные испытания электроплавки хвостов обогащения руды месторождения Шалкия в смеси с коксом, стальной стружки, магнетитовым концентратом и сульфидной рудой с выплавкой ферросилиция и улавливанием возгонов, содержащих цинк и свинец;
- рассчитать экономические показатели созданной технологии комплексной переработки цинксодержащей окисленной руды месторождения Шалкия и хвостов обогащения с получением марочного ферросилиция и Zn-Pb возгонов.

Объект исследований являются:

Объект исследования – оксидная природная и сульфидная техногенная цинксодержащая руда месторождения Шалкия.

Методы исследования объектов

Для выполнения задач исследований в работе использовали следующие методы: компьютерное термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса HSC-6.0 (Outokumpu, Финляндия), основанного на принципе минимизации энергии Гиббса; электроплавка в дуговых лабораторных и укрупненно-лабораторных электропечах; планирование эксперимента с использованием рототабельного плана второго порядка (план Бокса - Хантера); создание математических моделей образования целевых продуктов; построение 3D и плоскостных изображений с оптимизаций на их основе условий формирования марочного ферросилиция и извлечения цветных металлов. Для анализа сырья и продуктов в работе использованы инструментальные и химические методы: растровая электронная микроскопия JSM-6490LV (Япония) с системами энергодисперсионного микроанализа INCA; рентгенодифрактометрический на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с CuK α – излучением, β фильтр; рентгеноспектральный микроанализ на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe 733, JEOL (Япония); дифференциально термический на Дериватографе Q-1000D MOM (Paulik-Erdey, Венгрия); пикнометрический метод; гравиметрический метод определения кремния; комплексонометрический метод определения цинка.

Основные положения (доказанные научные гипотезы и другие выводы, являющиеся новыми знаниями), выносимые на защиту

1. Результаты исследований термодинамического моделирования взаимодействия сульфидов цинка, свинца, железа (и их смесей), а также окисленных и сульфидных руд месторождения Шалкия, хвостов ее обогащения с углеродом в присутствии железа и магнетита.
2. Оптимальные условия, обеспечивающие получение марочного ферросилиция при максимальном извлечении кремния в сплав, цинка и свинца в возгоны при электроплавке: смеси окисленной и сульфидной руды Шалкия; смеси хвостов обогащения и сульфидной руды Шалкия.
3. Результаты кинетики извлечения кремния в ферросплав из цинксодержащих руд Шалкия и хвостов ее обогащения.
4. Результаты укрупнено-лабораторных испытаний комплексной переработки электроплавкой хвостов обогащения руды Шалкия с получением марочного ферросилиция и Zn-Pb возгонов.

Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы

Сейчас в цинковой подотрасли отсутствует технология, комплексной переработки не только лежалых и текущих хвостов обогащения, но и труднообоготимых окисленных руд. Это, в частности, относится и к руде

месторождения Шалкия, переработка которой сопровождается образованием хвостов, накоплением в отвалах окисленной руды и низкой степенью комплексного использования сырья. В связи с этим возникла объективная необходимость в проведении целенаправленных физико-химических и прикладных исследований, результаты которых позволяют создать новую технологию комплексной переработки окисленных цинковых руд, хвостов обогащения руды Шалкия с одновременным получением в электропечи ферросилиция и возгонов, содержащих цинк и свинец с частичной заменой стальной стружки на магнетитовый концентрат.

Описание основных результатов исследования

Используя метод сопряжения компьютерного термодинамического моделирования и рототабельного планирования исследований второго порядка найдены условия получения ферросилиция марок FeSi25, FeSi45 и извлечения не менее 98% цинка, 90% свинца в газовую фазу из окисленной руды Шалкия, хвостов обогащения и их смесей.

На основании экспериментально полученных математических моделей определены оптимальные технологические параметры получения из окисленной руды Шалкия, хвостов обогащения руды и их смесей ферросилиция марок FeSi25, FeSi45 и возгонов, содержащих ΣZn и Pb 35,5-39,5%, при извлечении в сплав 75-85 % кремния и в возгоны 98-99% цинка и свинца.

Исследована кинетика извлечения кремния в ферросилиций при электроплавке окисленной руды Шалкия в смеси ее с хвостами обогащения, сульфидной рудой. Найдена лимитирующая стадия процесса в зависимости от состава шихты.

Углубленно - лабораторным испытаниям электротермической переработкой хвостов обогащения и сульфидной рудой в присутствии стальной стружки, кокса, магнетитового концентрата и сульфидной рудой установлено, что образование ферросилиция марки FeSi45, с извлечением в него 83-86% кремния, происходит при плавке хвостов с магнетитовым концентратом. Возгоны, содержащие до 31 % Zn и до 10,1 Pb, извлекается практический вес цинка и свинца.

Расчетные экономические показатели разработанной технологии получения ферросилиция и возгонов, содержащих цинк и свинец из смеси, окисленной и сульфидной руд, хвостов обогащения, показали, что прибыль при переработке 200 000 т руд и хвостов в год составит -21,6 – 22,2 млн \$ США, срок окупаемости инвестиций – 3 года, рентабельность -31,3-32,1%.

Обоснование новизны и важности полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании технологии комплексной электротермической переработки окисленных руд месторождения Шалкия, хвостов обогащения сульфидной руды Шалкия и их смесей с одновременным получением ферросилиция и возгонов, содержащих цинк и свинец

Новые научные результаты заключаются в следующем:

- Установлено, что температура углетермическое восстановления сульфида цинка на 414°C снижается если процесс проводить в присутствии магнетита; при этом ряд реакционной способности сульфидов изменяется в следующем образом $\text{PbS} > \text{ZnS} > \text{FeS}_2$.

- Найдено, что в равновесных условиях углетермическое восстановление ZnS в присутствии магнетита имеет стадийный характер: на первой стадии Fe_3O_4 восстанавливается до Fe и FeO . Затем происходит восстановление части (27,3%) ZnS железом. На последней стадии ($T > 1600^{\circ}\text{C}$) завершается (до 88,3% при 1800°C) образованием элементного цинка вследствие взаимодействия ZnS с FeO .

- Созданы термодинамические модели взаимодействия окисленной руды Шалкия и хвостов ее обогащения и их смесей с углеродом, магнетитом, железом, используя которые установлены температурные области существования Fe_3Si , Fe_5Si_3 , FeSi , FeSi_2 , $\text{FeSi}_{2.33}$, $\text{FeSi}_{2.43}$, Si , $\text{SiO}_{(g)}$, Zn , $\text{Zn}_{(g)}$, Pb , $\text{Pb}_{(g)}$, ферросилиция марок FeSi25 , FeSi45 и FeSi50 ;

- Используя созданные 3D изображения электроплавки окисленной руды Шалкия, хвостов ее обогащения и их смесей установлена причина уменьшения степени извлечения кремния в сплав при избытке углерода-образование газообразного SiO и SiC , и позитивное влияние железа на процессе в связи с разрушениями им карбида кремния;

- Установлено, что электроплавка окисленной руды Шалкия, хвостов ее обогащения и сульфидной руды в присутствии магнетита сопровождается явлением пенообразования расплава, связанным с присутствием в расплаве газообразных продуктов - CO , SO_2 , Zn , Pb ;

- Найдено, что извлечение кремния в сплав при электроплавке окисленной руды Шалкия и хвостов ее обогащения в присутствии магнетита протекает в переходном режиме.

Технологическая новизна исследований:

На основании экспериментально полученных математических моделей определены оптимальные технологические параметры (количество кокса, стальной стружки, степень замены железа дефицитной стальной стружки на железо магнетитового концентрата) получения из окисленной руды Шалкия, хвостов обогащения руды и их смесей ферросилиция марок FeSi25 , FeSi45 и возгонов, содержащих $\sum \text{Zn}$ и Pb 35,5-39,5%, при извлечении в сплав 75-85 % кремния и в возгоны 98-99% цинка и свинца.

Проведены укрупненно - лабораторные испытания электротермической переработки хвостов и сульфидной рудой установлено, что при образовании ферросилиция марки FeSi45 максимальная степень извлечение кремния в сплав (83-86%) происходит при плавке хвостов и руды в присутствии магнетитового концентрата. Возгоны, содержащие до 31 % Zn и 10,1 Pb , извлекается не менее 98 - 99% этих металлов.

Рассчитаны экономические показатели переработки окисленной руды и хвостов обогащения Шалкия. Прибыль при переработке в год 200 000 т руды составит -21,6 – 22,2 млн \$ США, срок окупаемости инвестиций – 3 года.

Важность полученных результатов:

Практическая значимость и технологическая новизна созданного способа переработки руды Шалкия подтверждена Патентом РК № 36683 на изобретение от 05.04.2024г.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки «Экология, окружающая среда и рациональное природопользование»; соответствует специализированному научному направлению «Глубокая переработка минеральных и органических ресурсов» национального научного совета при Правительстве Республик Казахстан.

Область исследования в соответствии с Классификатором научных направлений «Инжиниринг и технологии; Инжиниринг материалов; Металлургия»

Диссертационная работа выполнялась по целевому программному финансированию по теме «Разработка комплексной технологии переработки труднообогатимых полиметаллических руд месторождений Шалкия и Жайрем» в рамках программы BR19777171 «Разработка принципиально новых технологий комплексной переработки полиметаллического сырья» на 2023-2025 гг по договору № 35 от 16 июня 2023 г. между РГП на ПХВ «Национальным центром по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» и Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач работы, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, формулировании выводов, написании статей, патент и тезисов докладов.

Апробация работы: По результатам диссертационных исследований опубликовано 16 печатных работ, из них 6 статей в международных рецензируемых научных журналах, входящие в БД Scopus/Web of Science:

1. **Makhanbetova B.**, Shevko V., Aitkulov D. Producing A Ferroalloy And Zinc Concentrate From The Shalkiya Deposit Sulfide And Oxidized Ores' Mixture. Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan). -2025. - №. 28(1). Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan).2025. - №. 28(1).Vol.60 (**Procentile 69**)

2. Shevko V., **Makhanbetova B.**, Aitkulov D., Badikova A. Optimization of joint electric smelting of the Shalkiya sulfide ore and its beneficiation tailings with medium-silicon ferrosilicon production. Complex Use of Mineral Resources, 2025, 334(3), pp. 91–98 (**WoS, Q4**)

3. Shevko V., **Makhanbetova B.**, Aitkulov D., Badikova A., Amanov D. Thermodynamic and Experimental Substantiation of Comprehensive Processing of Zinc Sulfide Ore and Its Concentration Tailings to Extract Non-Ferrous Metals and Produce a Silicon Ferroalloy. Minerals. - 2024. - №. 14(8), 819. (**Procentile 74**)

4. Shevko V., **Makhanbetova B.**, Aitkulov D., Badikova A. Smelting a Zn – Pb Sulfide Ore with Magnetite and Carbon for the Production of a Silicon Alloy and Extraction of Zinc and Lead into Sublimates. Periodica Polytechnica Chemical Engineering. - 2024. - №. 68(1). (**Procentile 53**)

5. Shevko V., **Makhanbetova B.**, Aitkulov D. Theoretical and experimental substantiation of obtaining an alloy from flotation tailings of lead-zinc sulfide ore. Physicochemical Problems of Mineral Processing. - 2023. - №. 59 (1). (**Procentile 52**)

6. **Makhanbetova B.**, Shevko V., Aitkulov D., Lavrov B., Badikova A. Optimization of pyroprocessing of zinc sulfide ore to produce ferroalloy and zinc. E3S Web of Conferences 531, 010 (2024) (**Procentile 23**)

Патент:

1. Патент РК. Способ переработки высококремнистых сульфидных свинцово – цинковых руд. Патент на изобретение № 36683 KZ. Бюл.14. -опубл. 05.04.2024. (По заявке 2023/0004.1) Айткулов Д.К, Жарменов А.А , Абыкаев Н.А, Шевко В.М, Школьник В.С, Саткалиев С.О, Терликбаева А.Ж, Байсанов С.О, **Маханбетова Б.А**,Искаков Б.О.

Научные труды в материалах отечественных и зарубежных международных конференций:

1. Shevko V., Aitkulov D., **Makhanbetova B.**, Badikova A. Creation of a mining and metallurgical complex in the Kyzylorda. Proceeding VII International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2021, Volume I. 10-11.11.2021

2. **Makhanbetova B.A.**, Shevko V.M., Aitkulov D.K., Badikova A.D., Lavrov B.A. Oxidative firing of flotation tailings of the Shalkiya deposit enrichment. Science foundations of modern science and practice. Abstracts of X International Scientific and Practical Conference. Athens, Greece. -2021. - pp. 575-581.

3. Шевко В.М., **Маханбетова Б.А.**, Абжанова А.С., Тулеев М.А.Взаимодействие магнетита с сульфидами цинка и железа. Труды МНПК ««Ауэзовские чтения–20: наследие Мухтара Ауэзова - достояние нации». - Шымкент: ЮКГУ им. М. Ауэзова, 2022. -С224-228

4. **Маханбетова Б.А.**, Шевко В.М., Айткулов Д.К. Оптимизация извлечения кремния из руды Шалкия в присутствии углерода и железа. Материалы МНПК «Инновации и комплексная переработка минерального сырья-актуальные составляющие диверсификации экономики» (12-14 октября, Алматы). 2023.Т.1

5. **Makhanbetova B.**, Shevko V., Aitkulov D., Lavrov B. Thermodynamic influence of temperature on the quantitative distribution of sulfur in the Shalkiya sulfide ore -C-Fe system. Proceeding International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2023, Shymkent. Pp.223-227

6. **Makhanbetova B.**, Shevko V., Aitkulov D. Thermodynamic model of zinc, lead, and silicon extraction from the Shalkiya-C-Fe sulfide ore system. Proceeding International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2023, Shymkent. Pp.216-222

7. **Маханбетова Б.А.**, Шевко В.М., Айткулов Д.К. Поисковые исследования по влиянию углерода и железосодержащего материала при электроплавке руды Шалкия. Труды МНПК «Инновации и комплексная переработка минерального сырья – актуальные составляющие диверсификации экономики» (30 сентября – 1 октября 2024 г.) Алматы, 2024, Том 2, 152-155

8. Шевко В.М., Айткулов Д.К., **Маханбетова Б.А.** Кинетика извлечения кремния из цинксодержащих руд Шалкия и хвостов ее обогащения. Труды V Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в научных исследованиях» Москва: Международный центр «Новые научные исследования». -2025. -С.82-90

9. Шевко В.М., Айткулов Д.К., **Маханбетова Б.А.** Укрупненно-лабораторные испытания электроплавки хвостов обогащения руды месторождения Шалкия с получением ферросилиция и Zn-Pb возгонов. Международная научно-практическая конференция «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» Новосибирск. Сборник статей по материалам LXXXIV, №2 (75), 2025.-С.55-65.