

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАЛКИЯ

ВОРОБКАЛО Н.Р.<sup>1</sup> , БАЙСАНОВ А.С.<sup>1</sup> , ИСАГУЛОВА Д.А.<sup>2</sup> ,  
ИБРАХИМОВА Ж.А.<sup>2\*</sup> , ШАРИЕВА С.С.<sup>1</sup> ,

**Воробкало Нина Руслановна**<sup>1</sup> - PhD, старший научный сотрудник лаборатории «Пирометаллургические процессы», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

**E-mail:** [nina.timirbaeva23@gmail.com](mailto:nina.timirbaeva23@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3240-104X>

**Байсанов Алибек Сайлаубаевич**<sup>1</sup> - Кандидат технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Пирометаллургические процессы», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

**E-mail:** [alibekbaisanov@mail.ru](mailto:alibekbaisanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3025-7267>

**Исагулова Диана Аристотелевна**<sup>2</sup> - PhD, ассоциированный профессор кафедры «Нанотехнологии и металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан

**E-mail:** [isagulovada@mail.ru](mailto:isagulovada@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0166-0225>

**\*Ибрахимова Жанна Амантаевна**<sup>2</sup> – Магистрант, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан

**E-mail:** [zhanna.ibrahimova@mail.ru](mailto:zhanna.ibrahimova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0003-8622-6165>

**Шариева Сымбат Саматовна**<sup>1</sup> - Инженер лаборатории «Пирометаллургические процессы», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

**E-mail:** [shariyeva.symbat@mail.ru](mailto:shariyeva.symbat@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-3018-5458>

**Аннотация.** В условиях истощения запасов высококачественного минерального сырья особую актуальность приобретает разработка эффективных технологий переработки бедных и труднообогатимых руд. В настоящей работе рассматривается возможность получения ферросилиция из полиметаллической руды месторождения Шалкия методом карботермического восстановления с применением низкотемпературных восстановителей (спецкокса и низкотемпературного угля). Данное исследование выполнено с использованием метода термодинамического моделирования на базе программного комплекса HSC Chemistry (Outokumpu) в модуле «Equilibrium Composition». Рассчитаны равновесные фазовые соотношения в системе Fe-Si-Zn-C-O в широком температурном диапазоне (500-2100 °C), проведен анализ распределения элементов между металлической и газовой фазами. Установлено, что наибольшее извлечение кремния в ферросплав (до 90 %) достигается при температурах 1700-1900 °C, преимущественно в виде силицида железа (FeSi) и свободного кремния. Одновременно обеспечивается эффективное удаление цинка в газовую фазу при температурах выше 1600 °C. Полученные результаты подтверждают перспективность пирометаллургического подхода для глубокой переработки руд, содержащих кремнезём и летучие компоненты, без необходимости предварительного флотационного обогащения. Представленные данные могут служить основой для проведения опытных испытаний по получению различных кремнийсодержащих сплавов из руд месторождения Шалкия.

**Ключевые слова:** полиметаллическая руда; термодинамическое моделирование; HSC Chemistry, карботермическое восстановление; ферросилиций.

### Введение

Истощение запасов высококачественного сырья обуславливает необходимость вовлечения в переработку бедных и труднообогатимых руд, таких как полиметаллические руды месторождения Шалкия (Кызылординская область). Балансовые запасы данного месторождения составляют 129,35 млн тонн, а забалансовые 119,56 млн тонн. Содержание цинка в балансовом сырье составляет около 4,26 %, свинца 1,28 %, при этом содержание диоксида кремния достигает 56 % [1-4].

Месторождение Шалкия представляет собой одно из крупнейших в Казахстане по запасам свинцово-цинковых руд, однако их переработка сопряжена с рядом технологических трудностей. Сложный минеральный состав, одновременное присутствие сульфидных и окисленных форм

металлов, тонкая вкрапленность минералов, а также наличие трудноизмельчаемых пород и углеродистых включений снижают эффективность традиционных схем обогащения [5-8]. Присутствие углеродистых включений дополнительно осложняет процессы флотации, снижая эффективность извлечения за счёт сорбции реагентов на аморфном углероде [3, 9].

Даже при использовании современных методов обогащения потери свинца и цинка могут достигать 44% и 23% соответственно, что указывает на ограниченную эффективность традиционных технологий [10]. Это обуславливает необходимость поиска альтернативных подходов, направленных на более глубокое вовлечение руд в переработку.

Одним из таких направлений является пирометаллургическая переработка полиметаллической руды с получением кремнийсодержащих ферросплавов, например ферросилиция, при сопутствующем удалении летучих компонентов (Pb, Zn) в возгоны. Преимущество данного подхода заключается в возможности переработки труднообогатимых сульфидно-окисленных руд без предварительного флотационного разделения, а также в эффективном использовании кремнезёма, содержащегося в исходном сырье.

На фоне прогнозируемого дефицита доступных ресурсов переработка руд Шалкия с получением целевых ферросплавов приобретает стратегическое значение. Это направление позволяет одновременно решать задачи утилизации сложного минерального сырья и обеспечения промышленности востребованной продукцией.

Учитывая сложность протекающих в печи процессов и потенциальные трудности в их экспериментальном исследовании, особенно при высоких температурах, применение методов термодинамического моделирования становится особенно актуальным. Изучение физико-химических превращений, происходящих во время тех или иных высокотемпературных процессах, имеет важное значение при решении многих научно-технических задач. Однако проведение экспериментов по изучению данных процессов обычно связано с высокими затратами или, в определенных случаях, оказывается технически невозможным. В таком случае имеет место быть моделирование изучаемых систем на программных комплексах. Моделирование является эффективным способом поиска оптимальных параметров проектируемого технологического процесса или разрабатываемых технологий [11]. Полное термодинамическое моделирование является разновидностью математического планирования, так как позволяет в сотни раз сократить материальные и временные затраты при разработке новых технологий.

Таким образом, оценка реализуемости таких процессов как получение кремнистых сплавов из руды месторождения Шалкия, требует надёжной термодинамической проработки. В качестве инструмента анализа используется программный комплекс HSC Chemistry, основанный на минимизации энергии Гиббса. Он позволяет проводить моделирование равновесных реакций, оценивать фазовое распределение элементов и подбирать оптимальные условия плавки [12].

Целью настоящей работы является термодинамическое моделирование процесса получения ферросилиция из полиметаллической руды месторождения Шалкия на программном комплексе. На основе химического состава исходного сырья рассчитаны фазовые равновесия, определены условия, способствующие формированию целевого ферросплава, и проанализированы возможные побочные реакции.

#### **Материалы и методы исследования**

Для исследования возможности получения ферросилиция методом термодинамического моделирования на основе многокомпонентной системы Fe-Si-Zn-C-O в работе были использованы образцы руды с месторождения Шалкия, а также традиционные низкотемпературные восстановители в виде спеккокса и Шубаркульского угля.

Для получения данных о минеральном и техническом составе руды и восстановителей образцы были исследованы рентгенофлуоресцентным методом анализа на волнодисперсионном

спектрометре. Спектроскан МАХ-GVM (производитель НПО «Спектрон», Россия, Санкт-Петербург). Рентгеновский спектрометр работает по принципу: образец облучается рентгеновским излучением, измеряется интенсивность вторичного флуоресцентного излучения на нужных длинах волн, а затем определяется содержание элементов по заранее построенной калибровочной зависимости.

Изучение физико-химических превращений, происходящих при выплавке ферросилиция с использованием руды месторождения Шалкия проводили на программном комплексе HSC Chemistry (версия 6) в модуле «Equilibrium Composition», разработанном финской металлургической компанией Outokumpu. Принцип работы основан на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики. Программа позволяет рассчитывать равновесные состояния многокомпонентных систем при различных температурах и давлениях, что делает её особенно ценной при исследовании высокотемпературных металлургических процессов.

База данных используемой программы содержит термодинамические характеристики более 30 000 химических соединений и пополняется два раза в год. База данных HSC содержит сведения более чем о 30 000 химических соединений, включая их энтальпии, энтропии, теплоёмкости и другие характеристики. База регулярно обновляется (два раза в год), что гарантирует актуальность и достоверность получаемых результатов. Использование данного программного комплекса позволяет исследовать поведение системы без проведения дорогостоящих и трудоёмких экспериментов, а также оптимизировать состав шихты ещё на стадии проектирования технологии [12].

В качестве исходных данных для моделирования процесса получения титансодержащего ферросплава были выбраны следующие условия и параметры:

1. Температура. Термодинамический анализ осуществлялся в температурном интервале от 500 до 2100°C. Температура 500°C – начальное состояние системы, при котором не происходит значительных изменений. Температура 2100°C характеризует конечное состояние изучаемой системы, при которой происходит расплавление составляющих компонентов.

2. Давление. Давление было задано равным 0,1 МПа, что примерно соответствует давлению в 1 физ. атм., характерному для большинства металлургических процессов, в том числе и для процессов твердофазного углетермического взаимодействия.

3. Система замкнутая, нет обмена с окружающей средой.

#### **Результаты и их обсуждение**

Исходными шихтовыми материалами для выплавки ферросилиция является труднообогатимая полиметаллическая руда месторождения Шалкия. Химический состав руды месторождения Шалкия, полученный в ходе исследования представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав образцов руды месторождения Шалкия

Содержание, %										
SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	Fe	P	S	Pb	Zn	C
39,03	13,23	2,61	6,19	8,05	3,95	0,044	7,10	0,21	4,33	4,01

В качестве восстановителя рассматриваются низкотемпературные углеродсодержащие материалы в виде спеккокса и угля месторождения Шубаркуль, благодаря их высокому содержанию углерода (50,4% и 86,8% соответственно), а также благоприятным технико-химическим характеристикам, которые представлены в таблице 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Характеристика угля месторождения Шубаркуль

Материал	Содержание, %									
	Технический состав				Химический состав золы					
	C <sub>тв</sub>	A	V	W	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Уголь Шубаркуль	50,4	2,9	42,0	9,0	57,09	22,19	2,68	2,56	7,11	0,54

Шубаркульский уголь отличается высоким выходом летучих (42%) и низкой зольностью (2,9%), что способствует активному восстановлению оксидов марганца и снижению шлакообразования. Кроме того, его зола содержит умеренное количество кремнезема (57,09%) и глинозема (22,19%).

Таблица 3 – Характеристика спецкокса

Материал	Содержание, %									
	Технический состав				Химический состав золы					
	C <sub>тв</sub>	A	V	W	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Спецкокс	86,8	5,8	4,3	10,6	60,91	22,31	2,68	4,70	7,53	0,133

Спецкокс характеризуется высокой концентрацией углерода, а также низким содержанием летучих веществ и влаги, что делает его эффективным восстановителем в высокотемпературных условиях. Его зола содержит схожие компоненты (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), но в несколько меньших концентрациях, при этом отличается повышенным содержанием MgO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что может влиять на состав и свойства шлака.

Далее, был произведен расчет рабочего тела для термодинамического моделирования процесса выплавки на основе многокомпонентной системы Fe-Si-Zn-C-O, который представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Состав рабочего тела для выплавки ФС65 с использованием спецкокса в качестве восстановителя, кг

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Fe	C <sub>тв</sub>
63,00	3,03	3,30	12,18	25,8

Для установления распределения элементов по системе металл-газ с помощью программного комплекса «HSC Chemistry» были взяты следующие соединения, составляющие конденсированную (металлическую и оксидную) и газовую фазу:

Конденсированная фаза: SiO<sub>2</sub>, FeSi, C, Fe, FeSiO<sub>3</sub>, SiC, Si, Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, ZnSiO<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>Si, Zn, ZnO, FeO, Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, FeSi<sub>2</sub>, FeO\*SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>ZnO<sub>4</sub>, ZnCO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub>, Fe(CO)<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>(CO)<sub>9</sub>.

Газовая фаза: CO(g), SiO(g), Fe(g), Zn(g), Si(g), Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(g), CO<sub>2</sub>(g), Si<sub>2</sub>(g), SiC<sub>2</sub>(g), SiO<sub>2</sub>(g), FeO(g), Fe<sub>2</sub>(g), SiC(g), O(g), C(g), C<sub>2</sub>O(g), ZnO(g), C<sub>2</sub>(g), O<sub>2</sub>(g), FeO<sub>2</sub>(g), Fe(CO)<sub>5</sub>(g).

Далее, на рисунках 1-4, представлены результаты термодинамического моделирования в виде графиков зависимости изменения количественного содержания конденсированных и газовых фаз системы Fe-Si-Zn-C-O для каждого рассчитанного состава рабочих тел.

В результате моделирования процесса выплавки ферросилиция с низкзолным углем (рисунок 1) установили, что реакции восстановления основных элементов начинаются при температуре 1300 °С. Активное металлообразование происходит в температурном интервале 1300-1800 °С. Степень извлечения кремния в сплав в виде FeSi, Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> и свободного кремния

составляет в среднем 85-90 %.

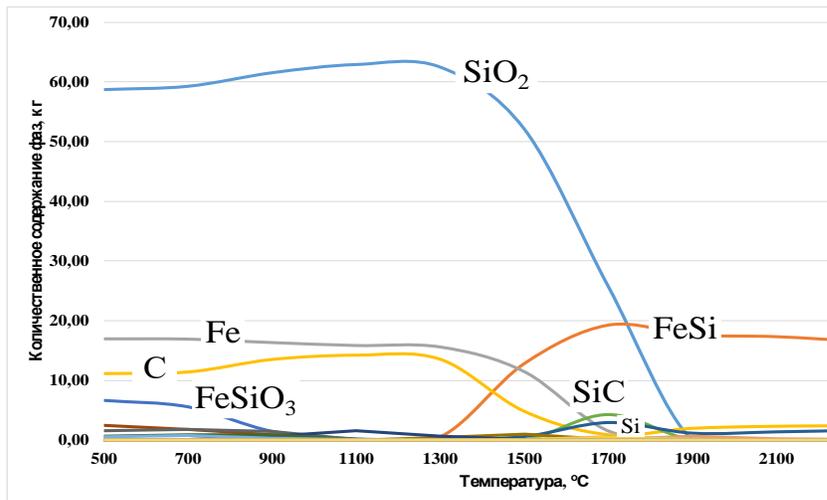


Рисунок 1 - Зависимость изменения содержания конденсированных фаз от температуры

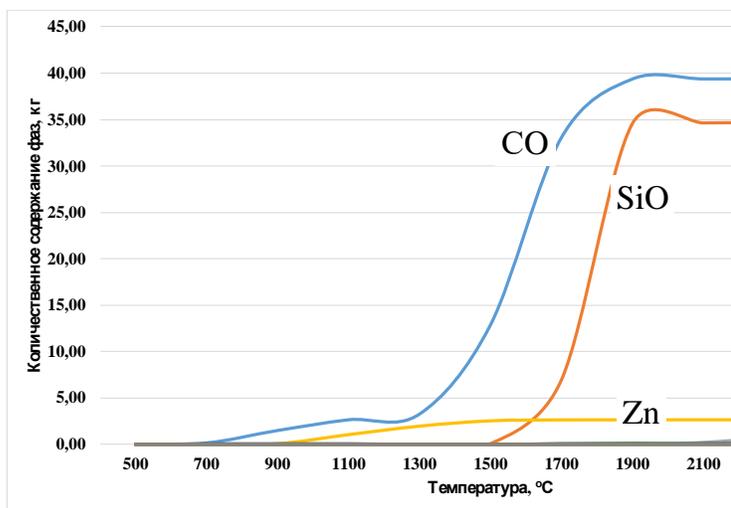


Рисунок 2 - Зависимость изменения содержания конденсированных фаз от температуры

На рисунке 1 представлены результаты термодинамического моделирования изменения состава твёрдой (конденсированной) фазы при повышении температуры в системе Fe-Si-Zn-C-O. В температурном диапазоне 1300-1800 °С наблюдается интенсивное формирование металлических фаз: свободного кремния, силицидов железа (FeSi), а также карбидов (SiC). Это указывает на начало активных восстановительных реакций между диоксидом кремния и углеродом. Основной реакцией восстановления кремнезема является реакция (1):



Эта реакция начинает протекать при температуре 1540 °С (1813 К.) Наличие железа в системе способствует осаждению кремния в сплав, выводя его из зоны реакции и тем самым интенсифицируя восстановление кремнезема. В присутствии железа восстановление протекает по

реакции (2):



В интервале температур 1500–1900 °С прослеживается образование промежуточной фазы – карбида кремния (SiC) по следующей реакции (3):



Эта реакция особенно активна в более холодных зонах печи, где SiC может накапливаться, снижая проходимость материала и производительность агрегата. При дальнейшем повышении температуры (>1900 °С) SiC начинает разрушаться, особенно в присутствии избытка кремнезема и железа по реакции (4):

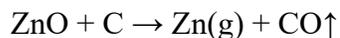


После чего образовавшийся кремний вступает в реакцию (5) с железом:



Максимальное содержание кремнийсодержащих соединений достигается при температуре около 1800 °С, что свидетельствует об эффективном извлечении кремния в состав ферросплава. Установлено, что степень извлечения кремния в металлическую фазу составляет порядка 85-90 %, преимущественно в виде силицидов железа и свободного кремния.

Рисунок 2 иллюстрирует поведение газовой фазы системы в процессе нагрева. С увеличением температуры возрастает содержание летучих компонентов, образующихся в результате реакций восстановления и диссоциации. Начиная с температуры около 1500 °С, в газовой фазе начинают преобладать монооксид углерода (CO), оксид кремния (SiO), а также летучие соединения цинка. Особенно выражено возгонное поведение цинка: при температурах выше 1600 °С цинк преимущественно переходит в газовую фазу в виде Zn(g), ZnO(g) и комплексных соединений. В системе происходят реакции восстановления цинка по реакции (6):



В результате чего образующийся металлический цинк переходит в газовую фазу. С ростом температуры выше 1600 °С содержание Zn(g) и ZnO(g) в газовой фазе существенно возрастает, что указывает на эффективное удаление цинка из руды в виде возгонов. Это позволяет избежать его накопления в расплаве и снижает загрязнение целевого ферросплава.

Полученные данные подтверждают, что процесс карботермического восстановления руды с использованием низковольтных восстановителей обеспечивает высокую степень извлечения кремния в ферросплав и эффективное удаление цинка в газовую фазу. Такой подход целесообразен при переработке труднообогатимых кремний- и цинксодержащих руд, характерных для месторождения Шалкия.

#### **Заключение**

Результаты термодинамического моделирования подтвердили принципиальную возможность получения ферросилиция из полиметаллической руды месторождения Шалкия

методом карботермического восстановления. Установлено, что при температурах выше 1300 °С в системе Fe-Si-Zn-C-O эффективно протекают реакции восстановления диоксида кремния, а наибольшее извлечение кремния в ферросплав достигается при 1700-1900 °С. Образование кремнийсодержащих фаз в виде свободного кремния и силицида железа (FeSi) позволяет говорить о реальности получения ферросплава марки ФС65.

Показано, что в ходе процесса временно формируется карбид кремния, который при дальнейшем нагреве разлагается с выделением дополнительного количества кремния. Кроме того, установлено, что цинк, содержащийся в руде, эффективно удаляется в газовую фазу при температурах выше 1600 °С, что позволяет снизить загрязнение готового сплава и упростить систему его очистки.

Таким образом, пирометаллургическая переработка труднообогатимой кремний- и цинксодержащей руды Шалкия с получением ферросилиция может быть реализована в промышленных условиях. Предложенный подход позволяет обойти стадии флотационного обогащения, упростить технологическую схему и расширить минерально-сырьевую базу для производства ферросплавов в Казахстане.

*Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR19777171)*

#### Список литературы

1. Цинк Казахстана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zinc.kz/ru/> Дата обращения: 10.05.2025.
2. Месторождение Шалкия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tks.kz/ru/mestorozhdenie-shalkiya/> – Дата обращения: 10.05.2025.
3. Мотовилов И.Ю., Барменшинова М.Б., Телков Ш.А., Омар Р.С. Изучение вещественного состава и оценка гравитационной обогатимости окисленных полиметаллических руд месторождения РК // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 9. – С. 51–58. – Режим доступа: [https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/10/2409\\_51-58.pdf](https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/10/2409_51-58.pdf)
4. Moradi S., Monhemius J. Mixed Sulphide–Oxide Lead and Zinc Ores: Problems and Solutions // Minerals Engineering. – 2011. – Т. 24, № 10. – С. 1067–1076. – DOI: [10.1016/j.mineng.2011.05.014](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.014).
5. Есенгазиев А.М., Шарипов Р.Х., Маркаев Е.К., Сулейменов Э.Н. Особенности характеристики минеральных образований в свинцово-цинковом концентрате // Science and World. – 2017. – № 12 (52), Вып. I. – С. 49–57.
6. Semushkina L., Dulatbek T., Tusupbaev N., Nuraly B., Mukhanova A. The Shalkiya deposit finely disseminated lead-zinc ore processing technology improvement // Обогащение руд. – 2015. – № 2. – С. 8–14. – DOI: [10.17580/or.2015.02.02](https://doi.org/10.17580/or.2015.02.02).
7. Shevko V., Makhambetova B., Aitkulov D., Badikova A. Optimization of joint electric smelting of the Shalkiya sulfide ore and its beneficiation tailings with medium-silicon ferrosilicon production // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. – 2024. – № 3 (334). – С. 91–98. – DOI: [10.31643/2025/6445.31](https://doi.org/10.31643/2025/6445.31).
8. Victor M., Shevko, Baktygul A., Makhambetova, Dosmurat K., Aitkulov. Theoretical and experimental substantiation of obtaining an alloy from flotation tailings of lead-zinc sulfide ore // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2023. – Т. 59, Вып. 1. – DOI: [10.37190/ppmp/161853](https://doi.org/10.37190/ppmp/161853).
9. Избасханов К.С. и др. Полупромышленные испытания коллективной схемы обогащения полиметаллической руды месторождения «Шалкия» // ҚазҰТУ хабаршысы. – 2015. – № 5. – С. 311–320.
10. Makhambetova 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. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 175–182. – DOI: [10.6180/jase.202501\\_28\(1\).0017](https://doi.org/10.6180/jase.202501_28(1).0017).

11. Султангазиев Р.Б. Разработка и исследование технологии выплавки борсодержащих сталей для изготовления высокопрочных крепежных изделий: дис. ... д-ра PhD: 6D070900. – Караганда: КарГТУ, 2017. – 129 с.

12. Белов Г.В. Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем и информационное обеспечение термодинамических расчетов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. – М., 2006. – 32 с.

### References

1. Cink Kazahstana [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://zinc.kz/ru/> Data obrashcheniya: 10.05.2025.

2. Mestorozhdenie SHalkiya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://tks.kz/ru/mestorozhdenie-shalkiya/> – Data obrashcheniya: 10.05.2025.

3. Motovilov I.YU., Barmenshinova M.B., Telkov SH.A., Omar R.S. Izuchenie veshchestvennogo sostava i ocenka gravitacionnoj obogatimosti okislennyh polimetallicheskikh rud mestorozhdeniya RK // Gornyj zhurnal Kazahstana. – 2024. – № 9. – S. 51–58. – Rezhim dostupa: [https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/10/2409\\_51-58.pdf](https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/10/2409_51-58.pdf)

4. Moradi S., Monhemius J. Mixed Sulphide–Oxide Lead and Zinc Ores: Problems and Solutions // Minerals Engineering. – 2011. – Т. 24, № 10. – С. 1067–1076. – DOI: [10.1016/j.mineng.2011.05.014](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.014).

5. Esengaziev A.M., SHaripov R.H., Markaev E.K., Sulejmenov E.N. Osobennosti harakteristiki mineral'nyh obrazovanij v svincovo-cinkovom koncentre // Science and World. – 2017. – № 12 (52), Vyp. I. – S. 49–57.

6. Semushkina L., Dulatbek T., Tusupbaev N., Nuraly B., Mukhanova A. The Shalkiya deposit finely disseminated lead-zinc ore processing technology improvement // Obogashchenie rud. – 2015. – № 2. – С. 8–14. – DOI: [10.17580/or.2015.02.02](https://doi.org/10.17580/or.2015.02.02).

7. Shevko V., Makhambetova B., Aitkulov D., Badikova A. Optimization of joint electric smelting of the Shalkiya sulfide ore and its beneficiation tailings with medium-silicon ferrosilicon production // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. – 2024. – № 3 (334). – С. 91–98. – DOI: [10.31643/2025/6445.31](https://doi.org/10.31643/2025/6445.31).

8. Victor M., Shevko, Baktygul A., Makhambetova, Dosmurat K., Aitkulov. Theoretical and experimental substantiation of obtaining an alloy from flotation tailings of lead-zinc sulfide ore // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2023. – Т. 59, Vyp. 1. – DOI: [10.37190/ppmp/161853](https://doi.org/10.37190/ppmp/161853).

9. Izbaskhanov K.S. i dr. Polupromyshlennye ispytaniya kollektivnoj skhemy obogashcheniya polimetallicheskoy rudy mestorozhdeniya «SHalkiya» // Vestnik KazNTU. – 2015. – № 5. – С. 311–320.

10. Makhambetova 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. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 175–182. – DOI: [10.6180/jase.202501\\_28\(1\).0017](https://doi.org/10.6180/jase.202501_28(1).0017).

11. Sultangaziev R.B. Razrabotka i issledovanie tekhnologii vyplavki borsoderzhashchih stalej dlya izgotovleniya vysokoprochnyh krepzhnyh izdelij: dis. ... д-ра PhD: 6D070900. – Karaganda: KarGTU, 2017. – 129 s.

12. Belov G.V. Modelirovanie ravnovesnyh sostoyanij mnogokomponentnyh geterogennyh sistem i informacionnoe obespechenie termodinamicheskikh raschetov: avtoref. dis. ... д-ра tekhn. nauk: 05.13.18. – М., 2006. – 32 s.

## ШАЛКІЯ КЕНДІ ШИКІЗАТЫНАН ФЕРРОСИЛИЦИЙ АЛУ МҮМКІНДІГІНІҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ БАҒАЛАУЫ

**ВОРОБКАЛО Н.Р.<sup>1</sup> , БАЙСАНОВ А.С.<sup>1</sup> , ИСАГУЛОВА Д.А.<sup>2</sup> ,  
ИБРАХИМОВА Ж.А.<sup>2\*</sup> , ШАРИЕВА С.С.<sup>1</sup> **

**Воробкало Нина Руслановна<sup>1</sup>** – PhD, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институтының «Пирометаллургиялық процестер» зертханасының аға ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., Қазақстан

**E-mail:** [nina.timirbaeva23@gmail.com](mailto:nina.timirbaeva23@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3240-104X>

**Байсанов Алібек Сайлаубаевич<sup>1</sup>** – Техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институтының «Пирометаллургиялық процестер» зертханасының меңгерушісі, Қарағанды қ., Қазақстан

**E-mail:** [alibekbaisanov@mail.ru](mailto:alibekbaisanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3025-7267>

**Исагулова Диана Аристотелевна<sup>2</sup>** - PhD, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Абылқас Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан

**E-mail:** [isagulovada@mail.ru](mailto:isagulovada@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0166-0225>

**\*Ибрахимова Жанна Амантаевна<sup>2</sup>** – Магистрант, Абылқас Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан

**E-mail:** [zhanna.ibrahimova@mail.ru](mailto:zhanna.ibrahimova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0003-8622-6165>

**Шариева Сымбат Саматовна<sup>1</sup>** – Инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институтының «Пирометаллургиялық процестер» зертханасы, Қарағанды қ., Қазақстан

**E-mail:** [shariyeva.symbat@mail.ru](mailto:shariyeva.symbat@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-3018-5458>

**Андатпа.** Жоғары сапалы минералдық ресурстардың сарқылу жағдайында нашар және байыту қиын кендерді өндеудің тиімді технологияларын жасау ерекше өзектілікке ие болуда. Бұл жұмыста Шалқия кен орнының полиметалл кенінен ферросилицийді аз күлді тотықсыздандырғыштарды (арнайы кокс және аз күлді көмір) қолдану арқылы карботермиялық тотықсыздандыру арқылы алу мүмкіндігі қарастырылған. Зерттеу тепе-теңдік құрамы модуліндегі HSC Chemistry (Outokumpu) бағдарламалық пакетіне негізделген термодинамикалық модельдеу әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Fe-Si-Zn-C-O жүйесіндегі тепе-теңдік фазалық қатынастары кең температура диапазонында (500-2100°C) есептеліп, металдық және газ фазалары арасындағы элементтердің таралуына талдау жүргізілді. Кремнийдің феррокорытпаға ең жоғары экстракциясы (90%-ға дейін) 1700-1900°C температурада, негізінен темір силициді (FeSi) және бос кремний түрінде қол жеткізілетіні анықталды. Бұл ретте мырыштың газ фазасына тиімді кетуі 1600°C жоғары температурада қамтамасыз етіледі. Алынған нәтижелер алдын ала флотациялық байытуды қажет етпей, құрамында кремний тотығы мен ұшпа компоненттері бар кендерді терең өндеуге арналған пирометаллургиялық тәсілдің әлеуетін растайды. Ұсынылған деректер Шалқия кен орнының кендерінен құрамында кремний бар әртүрлі қорытпаларды алу бойынша тәжірибелік сынақтар жүргізуге негіз бола алады.

**Түйін сөздер:** полиметалдық кен, термодинамикалық модельдеу, HSC Chemistry, карботермиялық тотықсыздандыру, ферросилиций.

## THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF FERROSILICON PRODUCTION FROM SHALEKIA DEPOSIT ORE

**VOROBKALO N.R.<sup>1</sup> , BAISANOV A.S.<sup>1</sup> , ISAGULOVA D.A.<sup>2</sup> ,  
IBRAKHIMOVA Zh.A.<sup>2\*</sup> , SHARIYEVA S.S.<sup>1</sup> **

**Vorobkalo Nina Ruslanovna<sup>1</sup>** – PhD, senior researcher at the «Pyrometallurgical processes» laboratory, Zh. Abishev chemical-metallurgical institute, Karaganda, Kazakhstan

**E-mail:** [nina.timirbaeva23@gmail.com](mailto:nina.timirbaeva23@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3240-104X>

**Baisanov Alibek Sailaubayevich<sup>1</sup>** – Candidate of technical sciences, professor, head of the «Pyrometallurgical Processes» Laboratory, Zh. Abishev chemical-metallurgical institute, Karaganda, Kazakhstan

**E-mail:** [alibekbaisanov@mail.ru](mailto:alibekbaisanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3025-7267>

**Isagulova Diana Aristotelovna<sup>2</sup>** - PhD, associate professor of the department of nanotechnology and metallurgy, Karaganda technical university named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan

**E-mail:** [isagulovada@mail.ru](mailto:isagulovada@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-0166-0225>

\***Ibrakhimova Zhanna Amantaevna**<sup>2</sup> – Master’s student, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: [zhanna.ibrakhimova@mail.ru](mailto:zhanna.ibrakhimova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0003-8622-6165>

**Shariyeva Symbat Samatovna**<sup>1</sup> – Engineer at the «Pyrometallurgical processes» laboratory, Zh.Abishev chemical-metallurgical institute, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: [shariyeva.symbat@mail.ru](mailto:shariyeva.symbat@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-3018-5458>

**Abstract.** In the conditions of depletion of reserves of high-quality mineral raw materials, development of effective technologies for processing of poor and difficult-to-dress ores is of particular relevance. In this paper, the possibility of obtaining ferrosilicon from polymetallic ore of the Shalkiya deposit by carbothermic reduction using low-ash reducing agents (special coke and coal) is considered. The study was carried out using thermodynamic modeling methods based on the HSC Chemistry software package (Outokumpu) in the Equilibrium Composition module. Equilibrium phase relationships in the Fe-Si-Zn-C-O system were calculated in a wide temperature range (500-2100 °C), and an analysis of the distribution of elements between the metallic and gas phases was carried out. It was found that the highest extraction of silicon into ferroalloy (up to 90%) is achieved at temperatures of 1700-1900 °C, mainly in the form of iron silicide (FeSi) and free silicon. At the same time, effective removal of zinc into the gas phase is ensured at temperatures above 1600°C. The results obtained confirm the prospects of the pyrometallurgical approach for deep processing of ores containing silica and volatile components, without the need for preliminary flotation enrichment. The presented data can serve as a basis for conducting pilot tests to obtain various silicon-containing alloys from the ores of the Shalkiya deposit.

**Key words:** polymetallic ore, thermodynamic modeling, HSC Chemistry, carbothermal reduction, ferrosilicon.