

УДК 669.54:669.048

DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-71-80

ПОЛУЧЕНИЕ ЦИНКА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ ДИСТИЛЛЯЦИЕЙ ИЗ ВОЗГОНОВ ОТ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

**П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, Е.А. Мазулевский,
А.А. Мухаметжанова, А.Б. Сагындыков, Б.Т. Сахова**

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования по извлечению цинка высокой чистоты из возгонов, образующихся при электроплавке труднообогатимого полиметаллического сырья месторождения «Шалкия» с получением ферросилиция. Разработан пирометаллургический метод извлечения цинка и свинца с применением контролируемой атмосферы и вакуума. Установлено, что при температуре до 1100 °С в инертной среде дистиляция цинка практически не происходит из-за низкой упругости пара его оксидов. Повторная дистиляция в восстановительной атмосфере при 1100 °С позволяет получить более 95 % цинка, загрязнённого свинцом. Финальная очистка в условиях вакуума (10 Па, 800 °С, 1 час) обеспечивает получение цинка высокой чистоты с уровнем остаточных примесей менее 0,01 %. Полученные результаты демонстрируют технологическую возможность эффективного извлечения и очистки цинка из возгонов, образующихся при переработке бедного сырья, что открывает перспективы промышленной реализации данной методики для комплексного использования техногенных ресурсов.

Ключевые слова: цинк; свинец; дистиляция; возгоны; инертная атмосфера; восстановительная атмосфера; вакуум; полиметаллическое сырьё; очистка металлов.

ПОЛИМЕТАЛЛДУУ ЧИЙКИ ЗАТТЫ ЭЛЕКТР МЕНЕН ЭРИТҮҮ ПРОЦЕССИНЕН АЛЫНГАН ВОЗГОНДОРДОН ДИСТИЛЛЯЦИЯ ЖОЛУ МЕНЕН ЖОГОРКУ ТАЗАЛЫКТАГЫ ЦИНКТИ АЛУУ

**П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, Е.А. Мазулевский,
А.А. Мухаметжанова, А.Б. Сагындыков, Б.Т. Сахова**

Аннотация. Бул макалада Шалкия кенинин татаал байытылган полиметаллдык сырьесин электр менен эритүү учурунда ферросилицийди алуу менен пайда болгон возгондордон жогорку тазалыктагы цинкти алуу боюнча комплекстүү изилдөөнүн жыйынтыктары берилген. Теманын актуалдуулугу цинк жана коргошундун олуттуу көлөмүн камтыган техногендик калдыктарды кайра иштетүүгө тартуунун зарылдыгы, ошондой эле салттуу бай кен булактарынын түгөнүү шарттарында эффективдүү технологияларды өнүктүрүү менен негизделген. Изилдөөнүн максаты – көзөмөлдөнгөн атмосфера жана вакуум колдонуу менен цинк жана коргошунду пирометаллургиялык ыкма аркылуу алуу методун иштеп чыгуу. Изилдөөлөр көрсөткөндөй, 1100 °Сге чейинки температурада инерттүү чөйрөдө цинктин дистиляциясы анын оксиддеринин буу басымынын төмөндүгүнө байланыштуу дээрлик жүрбөйт. 1100 °С температурада калыбына келтирүүчү атмосферада кайталап дистиляциялоо цинктин 95 %-дан ашыгын алууга мүмкүнчүлүк берет, бирок ал коргошун менен булганган бойдон калат. Акыркы тазалоо вакуум шартында (10 Па, 800 °С, 1 саат) цинктин жогорку тазалыктагы үлгүсүн алууга шарт түзөт, анда калдыктар 0,01 %-дан төмөн. Алынган жыйынтыктар жакыр сырьелерди кайра иштетүүдө пайда болгон возгондордон цинкти эффективдүү алуу жана тазалоо технологиялык мүмкүнчүлүгүн көрсөтүп, техногендик ресурстарды комплекстүү пайдалануунун өнөр жайда ишке ашырылышына жол ачат.

Түйүндүү сөздөр: цинк; коргошун; дистиляция; возгондор; инерттүү атмосфера; калыбына келтирүүчү атмосфера; вакуум; полиметаллдык сырьё; металлдарды тазалоо.

PRODUCTION OF HIGH-PURITY ZINC BY DISTILLATION FROM CONDENSATES OF POLYMETALLIC SMELTING

*P.A. Osipov, R.A. Shayakhmetova, E.A. Mazulevsky,
A.A. Mukhametzhanova, A.B. Sagyndykov, B.T. Sakhova*

Abstract. The article presents the results of a comprehensive investigation into the extraction of high-purity zinc from condensates formed during the electric smelting of low-grade, hard-to-enrich polymetallic raw materials from the Shalkiya deposit, accompanied by the production of ferrosilicon. The relevance of the research lies in the growing need to develop technologies for processing industrial waste containing valuable metals, particularly in light of the depletion of easily accessible rich ore reserves. The aim of the work was to develop a pyrometallurgical method for extracting zinc and lead using controlled atmospheric and vacuum processes. It was established that at temperatures up to 1100°C in an inert atmosphere, zinc distillation is negligible due to the low vapor pressure of its oxides. However, secondary distillation in a reducing atmosphere at the same temperature resulted in more than 95% recovery of zinc, though still contaminated with lead. A final purification step conducted under vacuum conditions (10 Pa, 800°C, 1 hour) yielded high-purity zinc with a residual impurity level below 0.01%. The results obtained dismantle the technological possibility of efficient extraction and purification of zinc from storage facilities formed during the processing of poor raw materials, which opens up prospects for the industrial implementation of this technique for the integrated use of man-made resources.

Keywords: zinc; lead; distillation; fumes; inert atmosphere; reducing atmosphere; vacuum; polymetallic raw materials; metal purification.

Введение. Истощение существующих богатых легко вскрываемых месторождений подталкивает исследователей-металлургов к разработке новых технологий, позволяющих перерабатывать труднообогатимое, низкокачественное техногенное сырье [1]. По добыче цинка Республика Казахстан занимает седьмое место после КНР, Австралии, Перу, Канады, США и Мексики и одиннадцатое место по производству рафинированного цинка. В то же время по данным Геологической службы США Казахстан обладает значительными разведанными запасами цинка, позволяющими рассчитывать на более высокие места в мире [1]. К труднообогатимым и низкосортным материалам также относится пыль и возгоны электросталеплавильного производства, которые содержат соединения цинка и свинца в достаточном количестве [2, 3].

В настоящее время пирометаллургическим способом получают около 15 % цинка и свинца, который заключается в отгонке в вакууме или дистилляции полиметаллических штейнов цинка из цинк-содержащих материалов [4, 5]. В основе этого способа лежит процесс восстановления оксида цинка при температуре выше точки его кипения. Дистилляция цинка может осуществляться в различных агрегатах: горизонтальных ретортах; вертикальных ретортах; электрических и шахтных печах, как в инертной атмосфере, так и вакууме [6–10]. Это обеспечивает его выделение в газообразном состоянии в процессе восстановления, возгонку в виде паров с последующей конденсацией.

В процессе электроплавки труднообогатимого полиметаллического сырья месторождения «Шалкия» с получением ферросилиция, образуются возгоны, в которых концентрируется цинк и свинец [11–12]. Во всех процессах выплавки, несмотря на разновидность шихты и получаемого ферросплава, наблюдается восстановление цинка и свинца до металлического состояния, улетучивание их в газовую фазу, окисление цинка до оксида и осаждение в рукавных фильтрах в виде оксида цинка и металлического свинца.

Из изложенного выше следует, что разработка технологии переработки возгонов от электроплавки концентрата руд месторождений «Шалкия» и «Жайрем» с получением цинка и свинца соответствует принципу единого технологического сырья и вполне актуальна.

Целью исследований являлось изучение физико-химических свойств возгонов для дальнейшего извлечения из них цинка и свинца пирометаллургическими способами с применением контролируемой атмосферы и вакуумных процессов.

Методы исследований. Настоящее исследование направлено на разработку и экспериментальную верификацию технологии извлечения цинка и свинца из твёрдых возгонов, образующихся в процессе

пирометаллургической переработки цинксодержащего сырья. В качестве основного подхода использовался метод вакуумной дистилляции, обеспечивающий термическое разложение и испарение летучих компонентов с последующей их конденсацией в чистом виде.

Эксперименты проводили на специально собранной лабораторной установке, которая включает электропечь с точностью регулирования температуры ± 5 °С в диапазоне 500–1300 °С; герметичную термостойкую стальную реторту; вакуумный насос ротационно-пластинчатый масляный; образцовый вакуумметр для контроля степени разрежения.

Процесс дистилляции включал следующие этапы: подготовка и загрузка образцов, герметизация системы, создание инертной атмосферы или вакуума, программируемый нагрев с выдержкой при целевой температуре, последующее охлаждение и сбор продуктов дистилляции (конденсатов и твёрдых остатков).

До начала анализа возгоны измельчали до порошкообразного состояния для обеспечения однородности и повышения точности измерений. Пробы хранили в герметичных контейнерах при комнатной температуре. Каждый образец анализировали три раза для повышения статистической достоверности результатов.

Химический состав исходных материалов и продуктов дистилляции определяли методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопией (ЭДРФА) с использованием системы INCA Energy 450, установленной на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6490LA. Метод позволяет с высокой точностью идентифицировать элементный состав поверхностей и срезов исследуемых материалов.

Фазовый состав руды, возгонов и продуктов дистилляции исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (РФА) на дифрактометре ДРОН 4-07, оснащённом кобальтовой анодной трубкой. Съёмку проводили при 30 кВ и 20 мА, со скоростью развёртки 2°/мин. Интерпретацию дифрактограмм осуществляли с использованием базы данных ASTM Powder Diffraction File и эталонных образцов минералов, что позволило достоверно идентифицировать кристаллические фазы и отслеживать фазовые превращения в ходе процесса дистилляции.

Количественное определение содержания свинца, цинка и оценка степени их извлечения выполняли с использованием фотоэлектрического фотометра КФК-3 «ЗОМЗ». Методика включала кислотное разложение образцов, приготовление калибровочных растворов и проведение фотометрических измерений в соответствующем спектральном диапазоне.

Результаты и обсуждение. Для отработки технологических параметров извлечения цинка и свинца из материала возгонов переработки руд месторождения «Шалкия» были проведены исследования влияния состава атмосферы на полноту и качество извлечения целевых компонентов в дистилляты. Для исследования использовали инертную атмосферу в виде газа аргона и инертно-восстановительную атмосферу, получаемую добавлением к исходной шихте углерода. Внешний вид исходных возгонов, полученных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) при различном увеличении приведён на рисунке 1, их характерная спектрограмма – на рисунке 2, поэлементный состав – в таблице 1.

Из данных таблицы следует, что исследуемые возгоны представляют собой рыхлую массу, состоящую из округлых частиц неправильной формы различных размеров. Рассматриваемые образцы состоят из примерно равных количеств цинка и кремния, доля остальных элементов суммарно не превышает 25 %. Фазовый состав возгонов представлен на рисунке 3.

Полученные результаты показывают, что возгоны представлены следующими основными фазами: ZnO , Pb , SiO_2 , CaCO_3 , K_2O , Na_2O , Mn_2SiS_4 , $\text{Mg}_{3.5}\text{Al}_9\text{Si}_{1.5}\text{O}_{20}$. Цинк и щелочные металлы находятся в виде оксидов, что доказывает полное разложение полиметаллического сырья с высвобождением цинка из силикатной фазы. Кремний находится в виде кремнезёма не связанного с цинком и свинцом. Марганец и магний присутствует в возгонах в виде силикатных соединений.

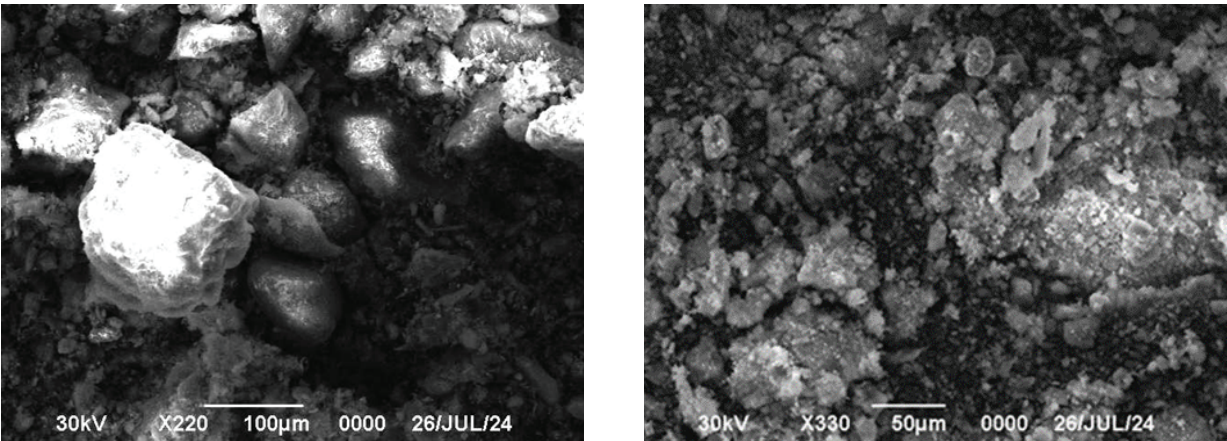


Рисунок 1 – Вид исходных возгонов, полученных на СЭМ при различном увеличении

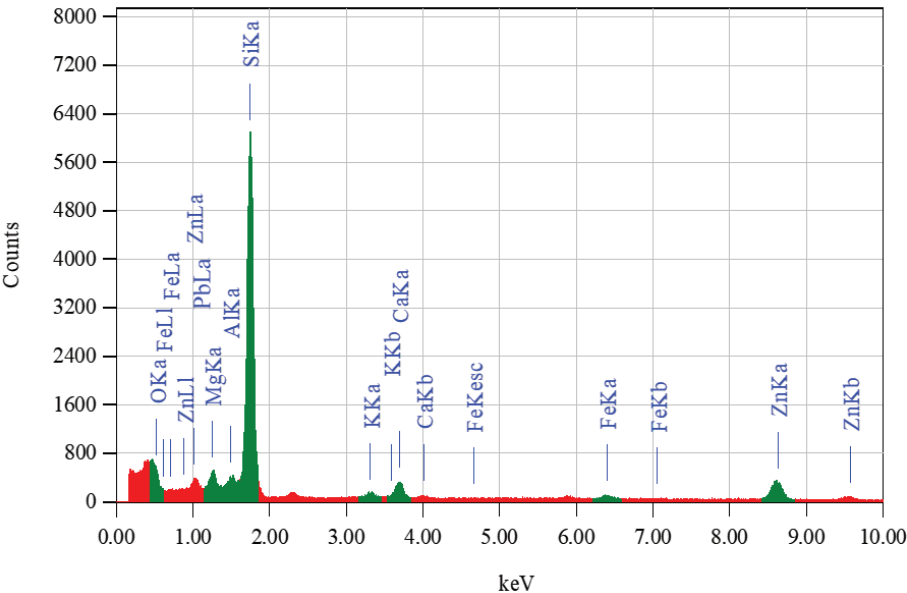
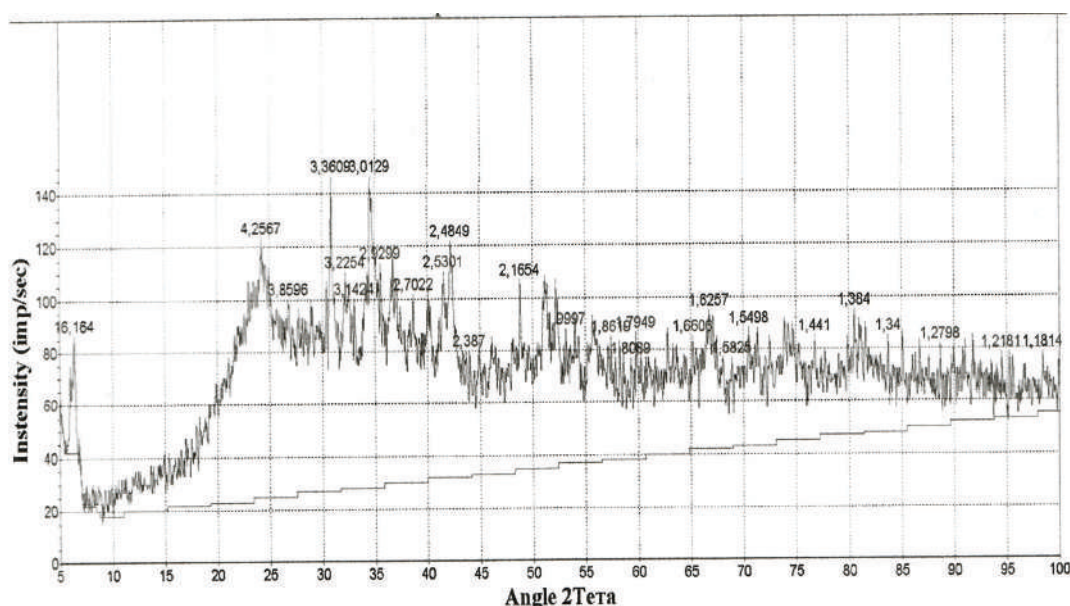


Рисунок 2 – Характерная спектрограмма исследуемых образцов

Таблица 1 – Элементный состав возгонов, полученных в процессе электроплавки руд месторождения «Шалкия»

Проба	Состав, вес, %													
	Zn	Pb	Mg	Ca	Mn	Na	K	Al	Si	S	Cl	Fe	O	Прочее
1	28,63	7,32	3,73	0,32	0,37	2,58	2,92	0,41	19,65	3,12	0,73	0,32	29,44	0,46
2	28,64	7,37	3,81	0,23	0,38	2,42	3,25	0,36	19,99	2,99	0,54	0,33	29,36	0,33
3	27,69	7,64	3,97	0,28	0,34	2,39	3,03	0,39	20,58	3,08	0,34	0,38	29,72	0,17
Среднее	28,32	7,44	3,84	0,28	0,36	2,46	3,07	0,39	20,07	3,06	0,54	0,34	29,51	0,32



Рефлексы: 3.86, 3.02, 2.83 2.48, 2.28, 2.07, 1.91, 1.63, 1.53 Å - CaCO_3 (ASTM –5-586)

Рефлексы: 2.83, 2.61, 2.48, 1.91, 1.62, 1.45, 1.37 Å - Zn O (ASTM –76-704)

Рефлексы: 2.83, 2.70, 2.53, 1.97, 1.63, 1.51, 1.39, 1.36 Å - Pb (ASTM – 23-345)

Рефлексы: 4.26 3.36 2.45 1.81 Å - SiO_2 (ASTM – 5-490)

Рефлексы: 3.11, 3.04, 2.83, 2.78, 2.17, 1.83 Å - Mn_2SiS_4 (ASTM – 18-800)

Рефлексы: 3.04, 2.16, 1.81 Å - K_2O (ASTM - (10-235)

Рефлексы: 3.22, 2.78, 1.97 Å - Na_2O (ASTM 23-528)

Рефлексы: 3.01, 2.83, 2.45, 3.34, 2.03, 1.44, 1.18 Å - $\text{Mg}_{3.5}\text{Al}_9\text{Si}_{11.5}\text{O}_{20}$ - Sapphirine (ASTM 21-549)

Рентгеноаморфная составляющая.

Рисунок 3 – Рентгенофазовый анализ возгонов

С целью выяснения поведения свинца и цинка при высоких температурах и возможности повторного концентрирования цинка в дистиллятах, термические свойства первичных возгонов изучали на дериватографе Q-1500D. Полученная термограмма первичных возгонов, полученных в процессе электроплавки руд месторождения Шалкия, приведена на рисунке 4.

Термические процессы, происходящие с образцом при нагревании в атмосфере азота до 1100 °С, на кривой ТГ регистрировали несколько процессов с уменьшением массы образца. Интервал температур от комнатной до 500 °С связан с процессом дегидратации адсорбированной и цеолитной воды, наряду с процессом десорбции адсорбированных газов. На это указывает плавный беспереходный экзотермический эффект в данном интервале температур. В интервале температур от 500 до 620 °С наблюдается относительно стабильная область без четких термических эффектов.

Далее с повышением температуры наблюдается эндотермический эффект начиная с 680 °С. По поведению кривой ТГ можно предположить, что при этой температуре начинается процесс разложения образца с образованием некоторого газообразного продукта, возможно вызванного разложением CaCO_3 и Mn_2SiS_4 и образованием новых соединений на их основе. При этом по кривым ДТА и ТГ можно четко выделить ступенчатость процесса разложения. Так на первой ступени теряется около 2 % от общей массы образца, в то время как во второй ступени разложения улетучивается более 4 %. Общая потеря массы при нагревании до 1100 °С оценивается в 7,6 %.

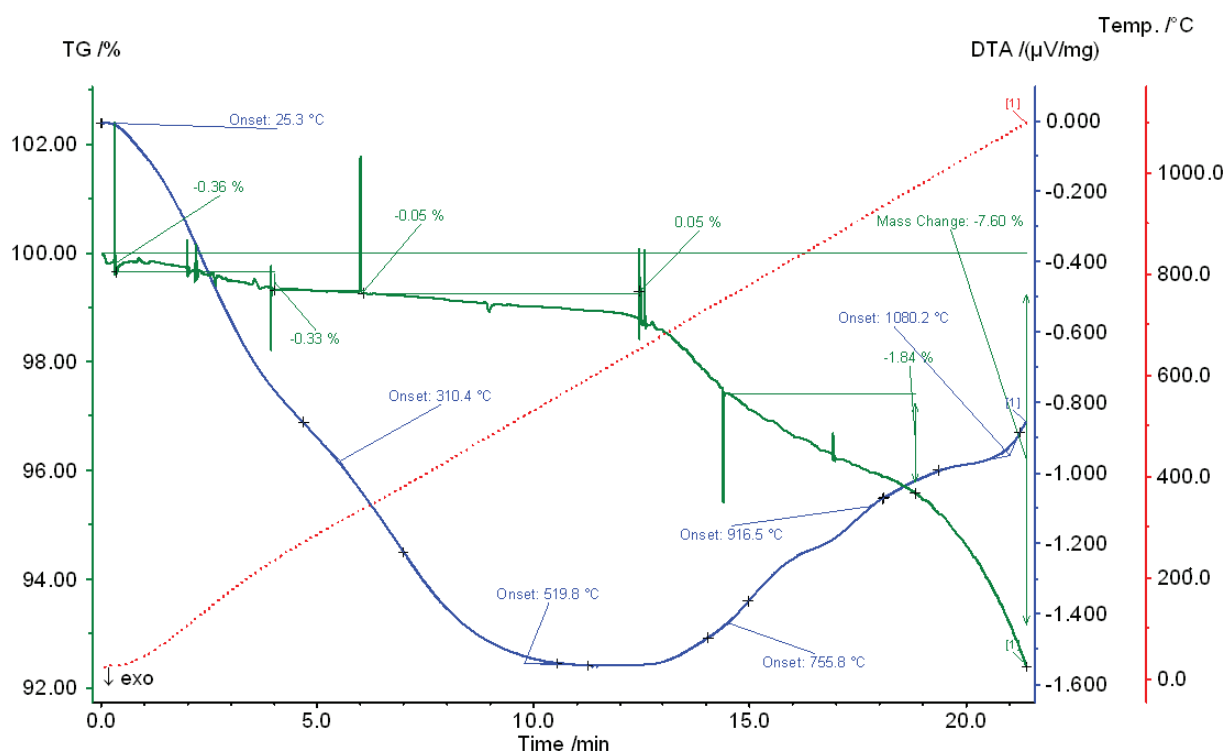


Рисунок 4 – Термограмма возгонов, полученных в процессе электроплавки руд месторождения «Шалкия»

Термические исследования показали, что разложение исходных возгонов и извлечение цинка, свинца или других элементов в дистилляты в инертной атмосфере при температуре до 1100 °C не происходит. Поэтому в дальнейших исследованиях для эффективного выделения цинка в процессе дистилляции необходимо использовать более высокие температуры процесса.

На основании полученных данных ДТА было решено провести повторную дистилляцию исходных возгонов приведенного выше состава при температуре 1300 °C. Для этого исходные возгоны, в количестве 50 г загружали в алундовый контейнер, помещали его в реторту и создавали в ней инертную атмосферу, температура в испарителе составляла 1300 °C, а продолжительность процесса – 2 часа. Дистилляты собирались в низкотемпературной части реторты.

Количественно дистилляты составили 1,1 г что составляет менее 10 % от исходного содержания цинка в первичном образце. Внешний вид и поэлементный состав дистиллятов и остатка полученных при температуре 1300 °C в инертной атмосфере и снятых на СЭМ, приведен на рисунке 5 и в таблице 2.

Приведенные данные показывают, что данный образец состоит практически из чистого цинка с примесью свинца. Существенным недостатком данного способа получения цинка является малый выход целевого продукта – около 10 %. Это обусловлено тем, что подавляющее количество цинка находится в оксидной форме, которая при данной температуре является мало летучим компонентом, а свинец, находящийся в металлической фазе, также имеет незначительную летучесть при данной температуре.

Состав остатков после дистилляции при температуре 1300 °C в инертной атмосфере приведен в таблице 3.

Проведённые исследования дистилляции при 1300 °C в инертной атмосфере показали незначительное отделение цинка и свинца от остальных компонентов. Существенным недостатком данного

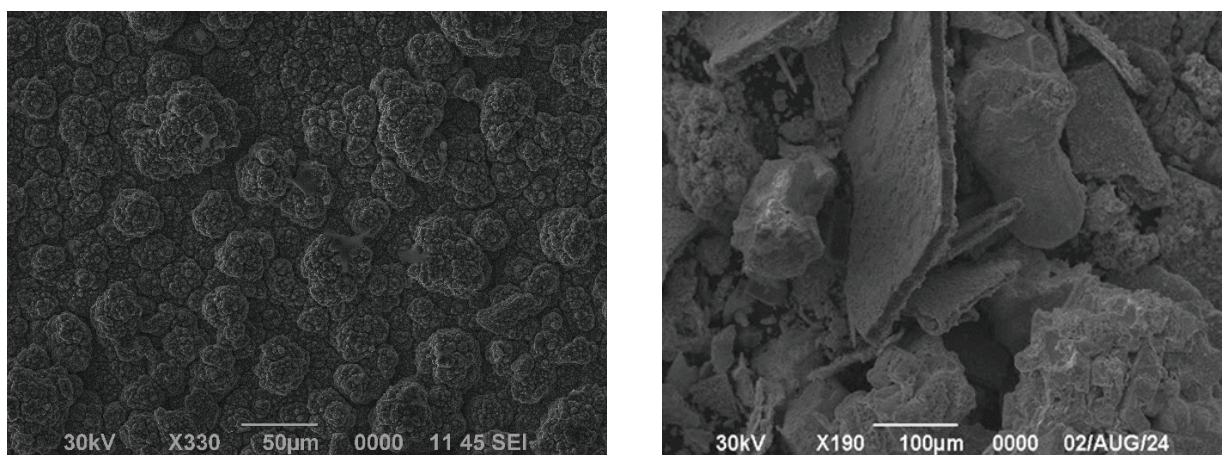


Рисунок 5 – Вид дистиллятов (а) и остатков (б) при температуре 1300 °С в инертной атмосфере полученных на СЭМ

Таблица 2 – Поэлементный состав образцов дистиллятов, полученных при температуре 1300 °С в инертной атмосфере

Элемент	O	K	Pb	Zn
Масс, %	0,72	0,19	3,54	95,53

Таблица 3 – Состав остатков после дистилляции при температуре 1300 °С в инертной атмосфере

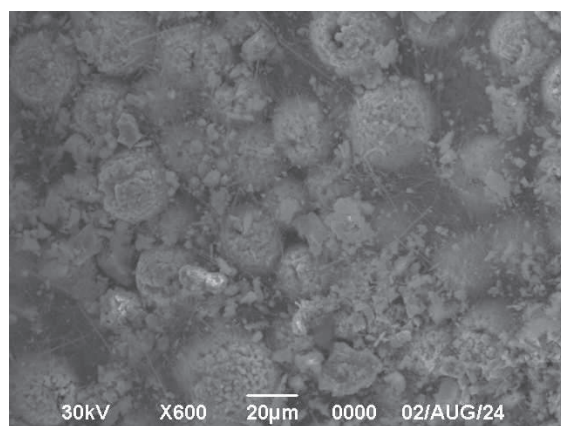
Элемент	Na	Mg	Si	S	K	Ca	Fe	Pb	Zn
Масс, %	2,61	1,43	28,52	2,96	2,93	0,63	4,02	24,36	17,04

способа является значительная примесь свинца в целевом продукте и очень маленький его выход. Это можно объяснить тем, что основная масса цинка в исходном продукте находилась в оксидной форме, имеющей очень низкие значения упругости пара, что и предопределило столь низкий его выход, а свинец имеющий температуру кипения $T_k = 1950$ °С, вполне мог попасть в дистиллят.

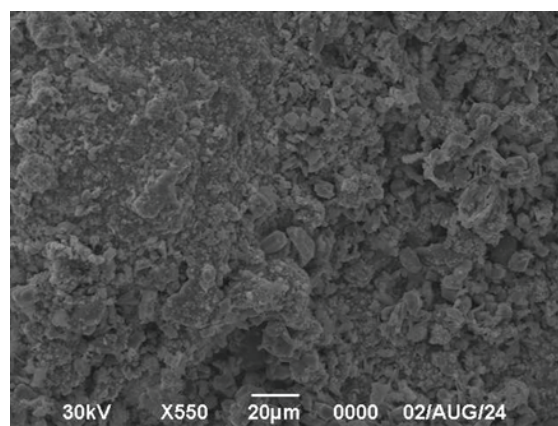
Таким образом, проведенные исследования по дистилляции материала исходных возгонов от переработки руд месторождения «Шалкия» при температуре 1300 °С показали, что при использовании инертной атмосферы происходит дистилляция цинка, обогащенного свинцом без дополнительных примесей, однако при этом выход целевого продукта незначителен менее 10 %.

Для получения более полного выхода целевого продукта из дистиллятов были проведены дистилляционные процессы при температуре 1100 °С в инертно-восстановительной атмосфере, которая получалась добавлением к исходным возгонам пылевидной угольной массы в количестве 5 % от общей массы образца. Данная температура процесса была выбрана исходя из следующих соображений. Проведённые термографические исследования показали, что при этой температуре основные компоненты первичных вагонов практически не летят. Повышение температуры дистилляции может привести к восстановлению диоксида кремния до летучего монооксида кремния, а снижение температуры приведёт к значительному увеличению времени восстановления оксида цинка.

Исходные продукты загружали в реторту описанным выше способом, время дистилляции также составляло 2 часа. Внешний вид дистиллятов и остатка, полученных в инертно-восстановительной атмосфере, выполненных на (СЭМ), приведены на рисунке 6, а поэлементный состав этих образцов – на рисунке 7.

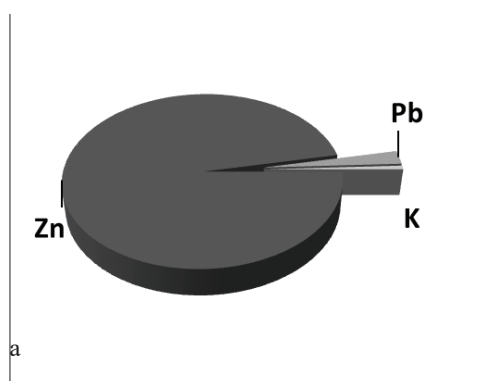


а

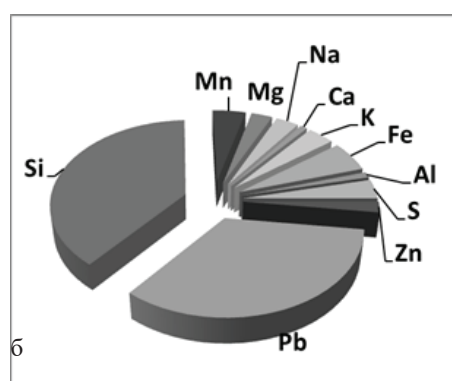


б

Рисунок 6 – Вид дистиллятов (а) и остатка (б) в инертно-восстановительной атмосфере при $T\ 1100\ ^\circ\text{C}$, полученных на СЭМ



а



б

Рисунок 7 – Поэлементный состав полученных образцов дистиллятов (а) и остатков (б), полученных при $T\ 1100\ ^\circ\text{C}$ в инертно-восстановительной атмосфере

Полученные результаты показывают, что при данных параметрах дистилляции основным примесным элементом у цинка также является свинец. Такие элементы как калий, натрий, сера и др. практически отсутствуют. Отличительной чертой процесса дистилляции при данных параметрах является то, что выход по цинку составил практически 95 %. Эти данные хорошо коррелируют с содержанием цинка в остатке.

Следует отметить, что после дистилляции в инертно-восстановительной атмосфере содержание цинка в остаточных компонентах резко уменьшилось практически до 2 %, а свинец с остальными примесными элементами практически полностью остался в остатке.

Таким образом, снижение температуры дистилляции до $1100\ ^\circ\text{C}$ в инертно-восстановительной атмосфере позволило повысить чистоту извлекаемого цинка, а свинец и основные сопутствующие примесные элементы оставить в остатке. Оставшейся в остатке свинец, имеющий температуру кипения $1900\ ^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении, можно выделить вакуумной дистилляцией при более высоких температурах.

Результаты проведенных ранее исследований показали, что в процессе дистилляции возгонов, образуемых в процессе электроплавки труднообогатимого полиметаллического сырья месторождения «Шалкия» в инертно-восстановительной атмосфере при температуре $1200\ ^\circ\text{C}$, происходит практически

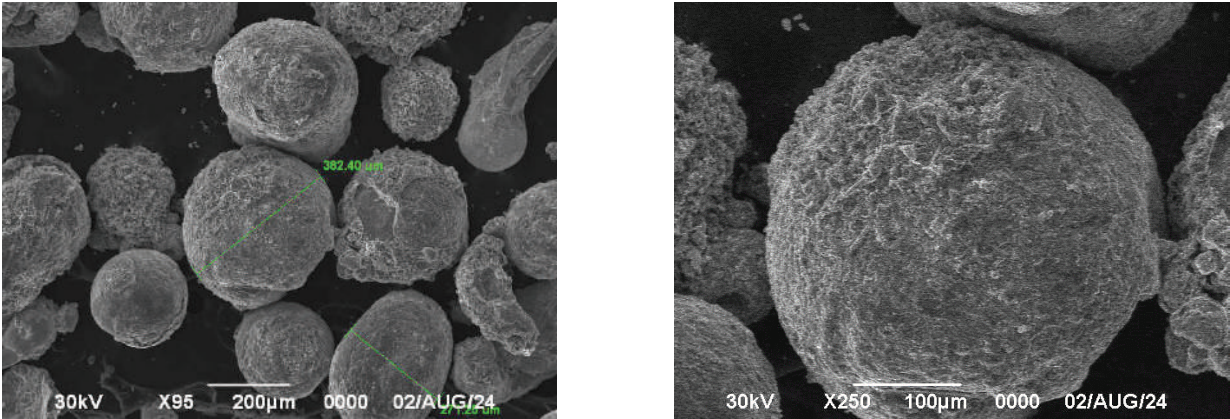


Рисунок 8 – Вид полученных на СЭМ вакуумных дистиллятов при температурах 800 °С

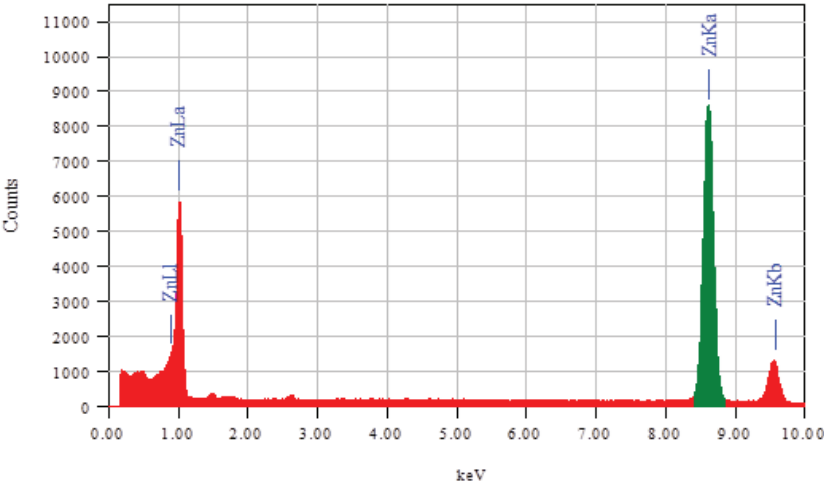


Рисунок 9 – Характерная спектрограмма вакуумных дистиллятов при температуре 800 °С

Таблица 4 – Поэлементный состав полученных образцов вакуумных дистиллятов

Элемент	Pb	Cd	Fe	Cu	Sn	As	Al	Zn
Масс, %	-	-	-	-	-	-	-	100

полная дистилляция цинка, однако, при этом наблюдается загрязнение его другими сопутствующими компонентами, количество которых может превышать 2–3 %.

Для дальнейшей очистки цинка от примесей была проведена повторная дистилляция полученных продуктов в вакууме при температуре 800 °С и времени 1 час. Алундовый контейнер с дистиллятом цинка, полученного дистилляцией в инертно-восстановительной атмосфере, помещали в реторту и создавали разрежение около 10 Па. При этом выход чистого цинка в вакуумный дистиллят составил более 93 %.

Внешний вид полученных вторичных вакуумных дистиллятов, выполненных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) при различном увеличении, приведен на рисунке 8.

Характерная спектрограмма вакуумных дистиллятов и их состав приведены на рисунке 9 и в таблице 4.

Приведенные данные показывают, что в пределах точности анализа данный образец состоит практически из чистого цинка.

Вывод. Таким образом, для получения цинка повышенной чистоты из возгонов электроплавки труднообогатимого полиметаллического сырья месторождения «Шалкия» с получением ферросилиция, рекомендуется проводить первичную дистилляцию в инертно-восстановительной атмосфере при температуре 1100 °С, а затем полученные возгоны дистиллировать в вакууме при температуре 800 °С в течение 1 часа. С помощью использования данной методики можно получить 95 %-ный выход цинка повышенной чистоты из исходных возгонов.

Поступила: 08.04.2025; рецензирована: 22.04.2025; принята: 23.04.2025.

Литература

1. Алишанов Р.А. Казахстан на мировом минерально-сырьевом рынке: проблемы и их решение / Р.А. Алишанов. Алматы, 2004. 220 с.
2. Шевко В.М. Новые принципы переработки оксидного природного и техногенного сырья / В.М. Шевко, Д.К. Айткулов // Промышленность Казахстана. 2019. № 3. С. 34–37.
3. Журавлев П.А. Анализ существующих технологий переработки сталеплавильной цинксодержащей пыли и направления дальнейших исследований / П.А. Журавлев, В.А. Кобелев // Чёрная металлургия. 2012. № 10. С. 80–83.
4. Романтеев Ю.П. Металлургия тяжёлых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий / Ю.П. Романтеев, В.П. Быстров. М.: Изд. дом МИСиС, 2010. 574 с.
5. Стовпченко А.П. Современное состояние проблемы переработки пыли дуговой сталеплавильной печи / А.П. Стовпченко, Ю.С. Прошад, Л.В. Камкина. URL: <http://cooperation/2009/theses/stovpchenko.html> (дата обращения: 02.02.2025).
6. Володин В.Н. Дистилляционные процессы разделения сульфидных и металлических расплавов: теория и технология: монография / В.Н. Володин, Р.А. Исакова. Караганда, 2015. 260 с.
7. Ji W. Separation and recovery of heavy metals zinc and lead from phosphorus flue dust by vacuum metallurgy / W. Ji, K. Xie, S. Yan // Journal of Environmental Management. 2021. Т. 294. С. 113001.
8. Исакова Р.А. Вакуумные технологии переработки полиметаллического сырья и рафинирования металлов: разработки и перспективы (к 50-летию лаборатории вакуумных процессов АО ЦНЗМО) / Р.А. Исакова, В.Е. Храпунов, В.Н. Володин // Цветные металлы. 2012. № 10. С. 69–74.
9. Королёв А.А. Фазовые равновесия в системе Pb-Zn при вакуумной дистилляции / А.А. Королёв, С.А. Краюхин, Г.И. Мальцев // Вестник Магнитогорского гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 4. С. 19–30.
10. Trebukhov S. Recovery of Zinc from the Concentrate of Domestic Waste Processing by Vacuum Distillation / S. Trebukhov, V. Volodin, A. Nitsenko, N. Burabaeva, G. Ruzakhunova // Metals. 2022. Т. 12. № 5. 703. DOI: 10.3390/met12050703.
11. Шевко В.М. Выплавка ферросплавов с применением коксующихся углей и отходов их добычи: монография / В.М. Шевко, Г.М. Сержанов, Г.Е. Каратаева и др. Шымкент: ЮКГУ им. М. Ауэзова, 2015. 237 с.
12. Алпатова А.А. Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью её утилизации: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Алпатова. М., 2016. 158 с.