

На правах рукописи

КЛЮШНИКОВ Александр Михайлович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕСТНОЙ
ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ
НИКЕЛЕВЫХ И СУЛЬФИДНЫХ МЕДНЫХ РУД**

Специальность 05.16.02 – Metallургия чёрных, цветных и редких металлов

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук
Селиванов Евгений Николаевич

Официальные оппоненты: Мальцев Геннадий Иванович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ОАО «Уралэлектромедь»,
главный специалист исследовательского центра,
г. Верхняя Пышма, Свердловская обл.

Агеев Никифор Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
г. Екатеринбург

Ведущая организация ОАО «Уралмеханобр»,
г. Екатеринбург

Защита состоится «2» февраля 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016 г. Екатеринбург, ул. Амурдсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Уральского отделения Российской академии наук и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук <http://www.imet-uran.ru>.

Автореферат разослан «__» декабря 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Дмитриев Андрей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Практика работы металлургических предприятий свидетельствует о том, что существующие технологии производства никеля и меди имеют ряд недостатков. В частности, окисленные никелевые руды из месторождений Урала ещё до недавнего времени перерабатывали по устаревшей схеме, связанной с восстановительно-сульфидирующей шахтной плавкой на штейн и его дальнейшей пирометаллургической переработкой с получением огневых никеля и кобальта. Изменение конъюнктуры на рынке цветных металлов привело к закрытию уральских никелевых комбинатов и полному прекращению переработки указанных руд в России.

Проблемным объектом являются также уральские сульфидные медные (медноколчеданные) руды, при флотационном обогащении которых выделяют медный, цинковый и пиритный концентраты. Известные пиро- и гидрометаллургические технологии, применяемые для переработки медных и цинковых концентратов, позволяют извлекать в товарные продукты медь, цинк и ряд сопутствующих элементов, при этом до 80 % содержащихся в руде кобальта и драгоценных металлов теряется с пиритными концентратами, рентабельных способов переработки которых до сих пор не найдено.

Одним из путей возобновления производства никеля из окисленных никелевых руд и одновременного повышения комплексности использования сульфидных медных руд может стать совместная переработка этих видов сырья. Модификация восстановительно-сульфидирующей плавки никелевой руды посредством использования медной руды в качестве сульфидизатора позволит перевести никелевый штейн в разряд медно-никелевых, сконцентрировать в нём кобальт и драгоценные металлы, снизить переход серы в газовую фазу и обеспечить пригодность штейна для переработки по известным технологиям. Поскольку базовым переделом, определяющим эффективность совместной переработки руд, является плавка на штейн, представляется необходимым проведение исследований, направленных на разработку её научных основ и установление оптимальных параметров ведения процесса.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени накоплен большой объём информации, связанной с физико-химическими основами технологических операций пирометаллургической переработки окисленных никелевых, сульфидных медных, медно-цинковых и медно-никелевых руд, параметрами и показателями переделов. В частности, многочисленными отечественными и зарубежными учёными изучены процессы штейнообразования при плавке окисленных никелевых руд с сульфидизаторами различной природы.

Результаты известных работ служат основой исследований в направлении создания новой технологии переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд. Однако научные и технологические аспекты совместной плавки подобного сырья с получением медно-никелевого штейна ранее не рассматривались.

Объект исследования – технология совместной переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд.

Предмет исследования – физико-химические процессы, протекающие в ходе совместной пирометаллургической переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд, взаимосвязь состава и свойств сырья, продуктов переработки с параметрами и показателями металлургических переделов.

Цель работы – научное обоснование и разработка рациональной технологии совместной переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд.

Задачи исследования:

- оценка состава, структуры и термических свойств исходных руд и продуктов их пирометаллургической переработки (огарков, штейнов, шлаков), выявление форм нахождения в них цветных металлов;

- анализ особенностей физико-химических взаимодействий в окисдно-сульфидных системах, формирующихся при обжиге и плавке никелевых и медных руд;

- оценка распределения целевых компонентов между продуктами обжига и плавки руд;

- определение оптимальных условий ведения процесса совместной плавки руд, связанных с количественным извлечением меди, никеля, кобальта и драгоценных металлов в полиметаллический штейн с заданным соотношением содержаний никеля и меди;

- технико-экономическое обоснование возможности промышленной реализации технологии.

Научная новизна и теоретическая значимость исследования:

- установлены формы нахождения меди, цинка и кобальта в медно-кобальтовой колчеданной руде Дергамышского месторождения и продуктах её частичного окислительного обжига;

- по результатам термодинамического моделирования совместной плавки обожжённой медной руды с окисленной никелевой рудой оценены равновесные составы и количества образующихся оксидных (шлак) и сульфидно-металлических (штейн) продуктов;

- экспериментально установлено влияние количественных соотношений между двумя типами руд и добавками углеродсодержащего восстановителя на расслаивание оксидно-сульфидных систем;

- определена последовательность превращений и реакций при совместном нагреве руд и продуктов их обжига с введением восстановителя;

- выявлены структура и межфазное распределение меди, никеля, кобальта и цинка в охлаждённом медно-никелевом штейне.

Практическая значимость работы:

- предложен состав шихты для восстановительно-сульфидирующей плавки руд, результатом применения которой является повышение комплексности использования сырья с получением товарных продуктов, содержащих медь, никель, кобальт, серу, драгоценные металлы, а также шлаков, пригодных для использования в качестве материалов строительного назначения;

- разработана рациональная технология совместной переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд, обеспечивающая извлечение никеля, меди, кобальта и драгоценных металлов в товарные продукты при сокращении потерь серы с газами;

- обоснованы основные параметры процессов обжига и восстановительно-сульфидирующей плавки руд, созданы предпосылки для возобновления производства никеля из окисленных никелевых руд уральских месторождений.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Урал–М» и методик экспериментов, обеспечивающих воспроизводимость результатов. При термодинамическом моделировании применён программный комплекс HSC Chemistry 6.1. Лабораторные эксперименты по нагреву и плавке образцов проведены на стандартном оборудовании (электропечи сопротивления). Состав, структура и термические свойства сырья и продуктов его переработки оценены методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии (Hitachi–Z8000), рентгенофлуоресцентной (S4 Explorer) и оптической эмиссионной спектрометрии (Spectroflame), рентгенофазового анализа (ДРОН–2), растровой электронной микроскопии (JSM–59000LV), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (OXFORD INCA Energy 200), термического анализа (NETZSCH STA 449 C Jupiter) и масс-спектрометрии (QMS 403 C Aëolos).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты изучения состава, структуры и свойств сульфидной медной руды Дергамышского месторождения, огарков, полученных при её частичном

окислительном обжиге, а также штейнов и шлаков, выделенных при совместной плавке указанного сырья с окисленной никелевой рудой Серовского месторождения.

2. Результаты термодинамического и экспериментального моделирования совместной пирометаллургической переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд.

3. Новая технология совместной переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций основана на использовании стандартных методик исследования, современного оборудования и специализированного программного обеспечения, подтверждается сходимостью результатов теоретического и экспериментального моделирования, их соответствием известным данным в области теории и практики металлургических процессов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015), XXI международной научно-практической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (Екатеринбург, 2016), XX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Екатеринбург, 2016), III конгрессе «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, 2017).

Личный вклад автора состоит в обосновании цели и задач исследования, планировании и выполнении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, обсуждении основных положений научного исследования и подготовке публикаций.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 10 работах, в числе которых 4 статьи в изданиях из перечня ВАК и заявка на патент на изобретение.

Связь диссертации с планами НИР. Исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательской работы Института металлургии УрО РАН (проект № 15–11–3–31).

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков, 24 таблицы, 3 приложения, список использованных источников включает 147 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и определена степень разработанности темы исследования, идентифицированы объект и предмет научного поиска, указана цель и установлены задачи работы, охарактеризована методологическая база. Здесь же дана оценка научной новизны и достоверности результатов, подтверждена их теоретическая и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе представлен анализ современных методов переработки минерального сырья, типичного для уральских месторождений – сульфидных медных и окисленных никелевых руд.

Состав и свойства сульфидных медно-кобальтовых руд осложняют использование традиционной технологии их переработки, основанной на флотационном обогащении с выделением медного, цинкового и пиритного концентратов. Тонкая вкрапленность минералов меди и цинка в пирите, а также относительно высокое содержание в нём кобальта и благородных металлов являются причинами низкого извлечения ценных элементов в мономинеральные концентраты. Высокие показатели комплексности использования сырья достигаются только при вовлечении в переработку пиритных хвостов флотации, однако рентабельность известных пиро- и гидрометаллургических схем зависит от рынка сбыта серной кислоты, шлаков, оксидных порошков и т.д. Необходимость утилизации всех продуктов обогащения сульфидных руд предопределяет значимость технологий их прямой пирометаллургической переработки.

Жизнеспособность схем переработки окисленных никелевых руд определяется их составом (в первую очередь содержанием никеля), структурой, стоимостью реагентов и энергоресурсов. Применительно к уральским рудам перспективно сочетание пиро- и гидрометаллургических переделов, обеспечивающих извлечение целевых (никель, кобальт) и сопутствующих (медь, железо, драгоценные металлы) компонентов.

Совместная восстановительно-сульфидирующая плавка окисленных никелевых и сульфидных медных руд на штейн позволит вовлечь в переработку труднообогатимое сульфидное сырьё (в т.ч. медно-кобальтовые руды) и использовать флюсующую способность никелевых руд. При этом в штейн будут извлекаться никель, медь, кобальт и драгоценные металлы, содержащиеся как в никелевой, так и в медной рудах. Варьирование состава шихты и параметров работы агрегатов позволит выделить продукт требуемого качества в отношении металлизации, соотношения Ni : Cu, содержания цветных металлов и т.д. Возможно получение штейна, близкого к образующимся при плавке сульфидных медно-

никелевых концентратов, что предполагает его переработку с использованием известных технологий и процессов. Реализация предлагаемой схемы позволит повысить извлечение в товарные продукты цветных и драгоценных металлов, а также даст возможность снизить выбросы в атмосферу серосодержащих газов.

Вторая глава посвящена оценке структуры и термических свойств сульфидной медной и окисленной никелевой руд уральских месторождений.

В качестве исходных образцов взяты сульфидная медная руда Дергамышского месторождения, содержащая, %: 1,1 Cu, 0,01 Ni, 0,14 Co, 1,3 Zn, 0,2 Pb, 35,7 Fe, 31,0 S, 0,03 As, 13,0 SiO₂, 1,2 CaO, 1,2 Al₂O₃, 5,5 MgO, 0,7 г/т Au, 1,2 г/т Ag, 6,6 прочих; а также окисленная никелевая руда Серовского месторождения, %: 0,8–1,2 Ni, 8,0–9,8 Fe, 0,02–0,06 Co, 47,2–52,6 SiO₂, 13,6–22,5 MgO, 2,2–5,1 Al₂O₃, 1,0–2,3 CaO, 15,8–18,3 прочих.

Результаты рентгенофазового анализа медной руды указывают на присутствие пирита (49,4–54,5 %), сидерита (19,3–20,4 %), лизардита (12,6–17,0 %), кварца (6,1–7,1 %), халькопирита (2,7–3,3 %), кальцита (2,1 %) и сфалерита (1,2–2,0 %). Электронным зондированием образца (рис. 1) выявлены массивы сросшихся зёрен пирита размером 20–100 мкм, в составе которых обнаружено до 0,45 % Co. Включения сфалерита (5–20 мкм) содержат 4,6–29,6 % Fe, 0,21 % Co. Наличие в сфалерите до 10 % Cu обусловлено вкраплениями халькопирита. В пирите обнаружены одиночные кристаллы редкого минерала из группы серебряных колчеданов – аргентопирита. Размер зёрен сульфидных минералов цветных металлов не превышает 50 мкм, поэтому для их вскрытия и отделения методами обогащения потребуется весьма тонкое измельчение руды.

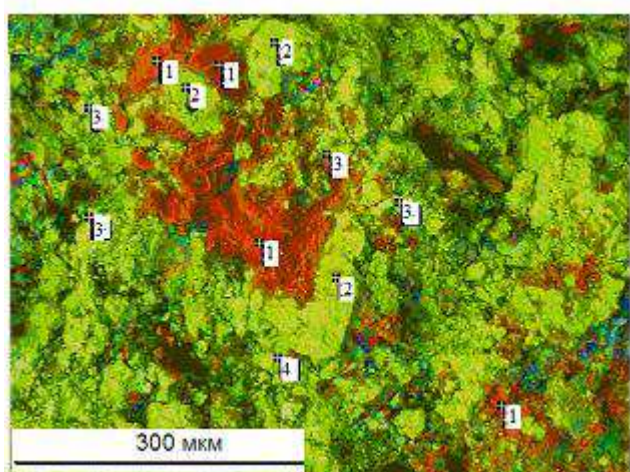


Рисунок 1 – Микроструктура медной руды и точки зондирования фаз:
1 – сепиолит, 2 – пирит, 3 – сфалерит,
4 – халькопирит

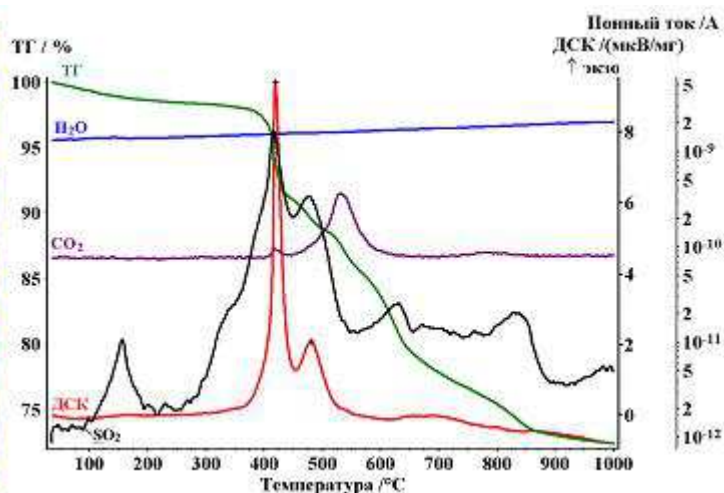


Рисунок 2 – Термограмма (воздух, 10 °С/мин) медной руды и данные масс-спектрометрического анализа газов

Нагрев измельчённой (менее 0,1 мм) руды на воздухе (рис. 2) сопровождается экзотермическими эффектами при 150, 420 и 480 °С. К этим же температурам близки экстремумы содержания SO₂ в газовой фазе. Первый подтверждает присутствие в руде моноклинного пирротина, в тонкоизмельчённом виде способного при низких температурах окисляться кислородом воздуха с образованием сульфата, второй и третий пояснены достижением температур воспламенения дисперсных пирита и пирротина. Следует предполагать развитие процессов диссоциации и окисления высших сульфидов, окисления выделившейся серы и вторичных сульфидов, разложения промежуточных соединений – сульфатов железа (620 °С), меди, цинка (836 °С). Разложение сидерита и гидратированных силикатов магния имеет место при 415–527 и 700 °С соответственно. Полученные данные определяют температуру окислительного обжига руды (700–900 °С).

Изотермическим нагревом образцов медной руды на воздухе показано, что температура (750–850 °С) и продолжительность (25–60 мин) обжига позволяют снизить содержание серы в огарке до 2,2–13,5 %, что соответствует десульфуризации (D_s , %) от 60 до 94 %. Содержание шлакообразующих компонентов в огарках меняется незначительно. Цветные металлы (кроме мышьяка и цинка) сохраняются в твёрдом продукте, их содержание достигает, %: 1,2–1,5 Cu, 0,01 Ni, 0,14–0,18 Co, 0,6–1,7 Zn, 0,02–0,03 As.

По данным рентгенофазового анализа охлаждённых огарков высшие сульфиды (пирит, халькопирит) в ходе окислительного обжига переходят в низшие и окисляются до ферритов. Изменение D_s с 60 до 73 % ведёт к снижению доли пирротина в огарках с 34,1 до 3,4 % и росту количества гематита. С повышением D_s до 94 % интенсивность рефлексов сфалерита, борнита и силикатов магния сокращается, а шпинелей $Me(Fe,Al)_2O_4$ (Me – Fe, Mg, Cu, Zn) – возрастает. Термическое разложение содержащихся в руде слоистых силикатов (серпентины) ведёт к появлению островных (оливины) и цепочечных (пироксены) минералов этого класса.

Микрорентгеноспектральным анализом уточнено распределение металлов по фазовым составляющим в продуктах обжига. В огарке с $D_s = 60$ % на фоне неупорядоченной текстуры почти все частицы в поле зондирования сохраняют присущую руде порфиробластовую структуру, для которой характерно чередование участков с преобладанием сульфидных либо оксидных компонентов размером 2–20 мм (рис. 3). Кристаллы пирротина имеют состав $Fe_{0,80-0,93}S$, в них содержатся медь и кобальт. Характерно наличие частиц, в которых ядро, состоящее из сфалерита, пирротина и борнита, окружено слоем тонкодисперсных оливинов и шпинелей, обогащённых цветными металлами. С повышением полноты окисления усиливается

миграция цветных металлов в решётку шпинелей и силикатов. Это отражается на реакционной способности вторичных минералов при последующей химической обработке.

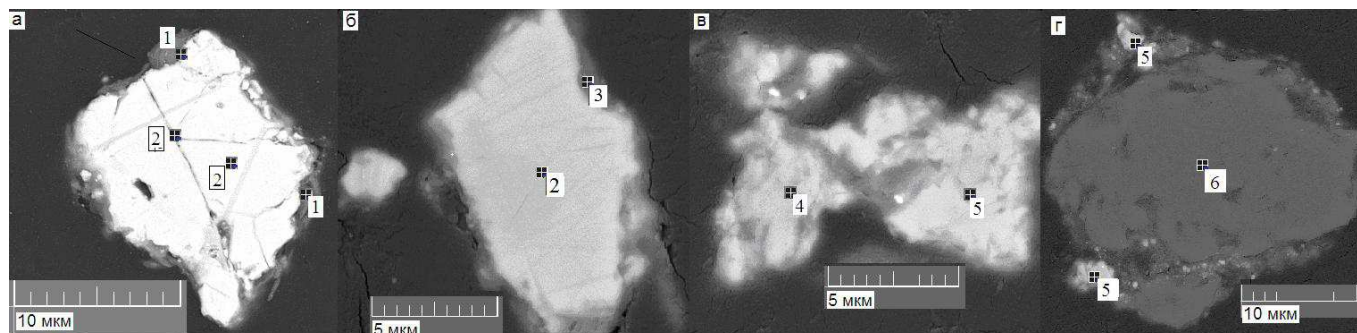


Рисунок 3 – Микроструктура огарка медной руды ($D_s = 60\%$) и точки зондирования фаз: 1 – $(\text{Mg,Zn,Al})\text{SiO}_3$, SiO_2 , $(\text{Fe,Zn})(\text{Fe,Al})_2\text{O}_4$, $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$; 2 – Cu_5FeS_4 , Fe_{1-x}S , $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$; 3 – $(\text{Mg,Al,Ni,Co})\text{SiO}_3$, Ni_3S_2 ; 4 – FeS_2 ; 5 – $\text{Fe}_{0,80-0,93}\text{S}$; 6 – SiO_2

Термическим анализом огарка ($D_s = 73\%$) в инертной среде (аргон) зафиксировано монотонное снижение массы образца, достигающее 10% ($1200\text{ }^\circ\text{C}$), связанное с выделением в газовую фазу SO_2 и разложением сульфатов. Соответствующие этим реакциям экстремумы на кривой ионного тока SO_2 отмечены при $519, 580, 657, 824, 994\text{ }^\circ\text{C}$. Эндотермические эффекты на кривой ДТА при $466, 527, 581, 999\text{ }^\circ\text{C}$ пояснены взаимодействием между оксидами железа и пирротинном (троилитом), разрушением магнетита троилитом с ошлакованием вюстита свободным оксидом кремния, плавлением сульфидных и оксидных фаз. Выделение CO_2 при $764\text{ }^\circ\text{C}$ свидетельствует о диссоциации карбоната магния. Сравнение результатов термической обработки огарка в нейтральной среде с данными нагрева исходной руды на воздухе указывает на меньшее содержание SO_2 в газовой фазе, несколько возрастающее при плавлении за счёт взаимодействия магнетита с троилитом.

Для ошлакования оксидов железа, образующихся при обжиге медной руды, применена окисленная никелевая руда Серовского месторождения. Её фазовый состав, %: 11,7–12,0 лизардита, 12,4–67,7 талька, 17,1–38,2 клинохлора, 10,2–32,8 кварца, 1,8–5,0 кальцита. С целью оценки эффективности использования такой руды определена её флюсующая способность (Φ_c , %). Полагая, что содержащиеся в руде оксиды после расплавления шихты будут связаны диоксидом кремния в такие соединения, как фаялит, ларнит, форстерит, кианит (моносиликатный шлак) или ферросилит, волластонит, энстатит, кианит (бисиликатный шлак), эту величину можно оценить по уравнению:

$$\Phi_c = C_{\text{SiO}_2}^{\text{исх}} - n^{-1} M_{\text{SiO}_2} (C_{\text{Fe}_{\text{общ}}} / M_{\text{Fe}} - C_{\text{CaO}} / M_{\text{CaO}} - C_{\text{MgO}} / M_{\text{MgO}} - n C_{\text{Al}_2\text{O}_3} / M_{\text{Al}_2\text{O}_3}), \quad (1)$$

где C_i – массовая доля i -го компонента, %; M_j – молярная масса j -го соединения, г/моль; n – коэффициент в формуле $n\text{MeO}\cdot\text{SiO}_2$. У рассматриваемой руды искомый показатель варьируется от 23,6–34,6 для моносиликатных шлаков ($n = 2$) до 1,3–19,5 для бисиликатных шлаков ($n = 1$).

Несмотря на низкую флюсующую способность, магнезиальные никелевые руды обладают определённым потенциалом для использования в качестве флюса, способного повысить рентабельность переработки медных руд за счёт перехода в штейн никеля, кобальта, меди и драгоценных металлов, содержащихся в никелевом сырье.

При нагреве в инертной атмосфере никелевой руды и огарка медной руды ($D_s = 73\%$), взятых в соотношении 100 : 60, получена термограмма (рис. 4), представляющая собой суперпозицию индивидуальных термограмм образцов. Сохраняется присущая исходным материалам основная тенденция, связанная с непрерывной монотонной потерей массы (11,6 % при 1300 °C) за счёт выделения в газовую фазу H_2O , CO_2 и SO_2 . Экстремумы на кривой ионного тока CO_2 при 536 и 714 °C пояснены разложением карбонатов. Максимумы на кривой ионного тока H_2O отвечают испарению адсорбционной и структурной влаги (161 °C), термолизу гидроксида железа (337 °C), разложению минералов группы серпентина (635 °C), талька (817 °C), хлорокиси (1000 °C). Параллельно протекают взаимодействия между сульфидами, сульфатами и оксидами, привнесёнными огарком медной руды, в результате чего на кривой ионного тока SO_2 проявляются пики при 499, 548, 986 °C. Характер кривой ДТА отражает процессы твердофазного окисления сульфидов, разложения гидратированных силикатов, плавления эвтектик (эндотермические эффекты при 480, 517, 553, 572, 1004, 1300 °C).

Добавление к смеси никелевой руды и огарка кокса (2,5 % от массы первой) не меняет существенным образом последовательность взаимодействий между фазами вплоть до температуры 1000 °C. На кривых ионных токов CO_2 и CO появляются дополнительные экстремумы при 997, 1057 и 1076 °C (рис. 4), поясняемые развитием реакции Будуара и восстановлением железа из оксидов. Резкое снижение высоты пика ионного тока SO_2 при 985 °C подтверждает сокращение перехода серы в газовую фазу за счёт её взаимодействия с восстановленными углеродом формами железа, происходящего в жидкой фазе. Термические эффекты при 1005 и 1300 °C отвечают плавлению эвтектик $\text{Fe}\text{--}\text{FeO}\text{--}\text{FeS}$ и $\text{FeO}_x\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{MgO}$. Указанные процессы рассматриваются как основа штейно- и шлакообразования в ходе нагрева смеси.

Полученные данные позволяют заключить, что при нагреве до 1300 °C смеси никелевой руды, огарка медной руды и кокса протекают параллельные реакции:



Таким образом, введение восстановителя подавляет переход серы в газовую фазу.

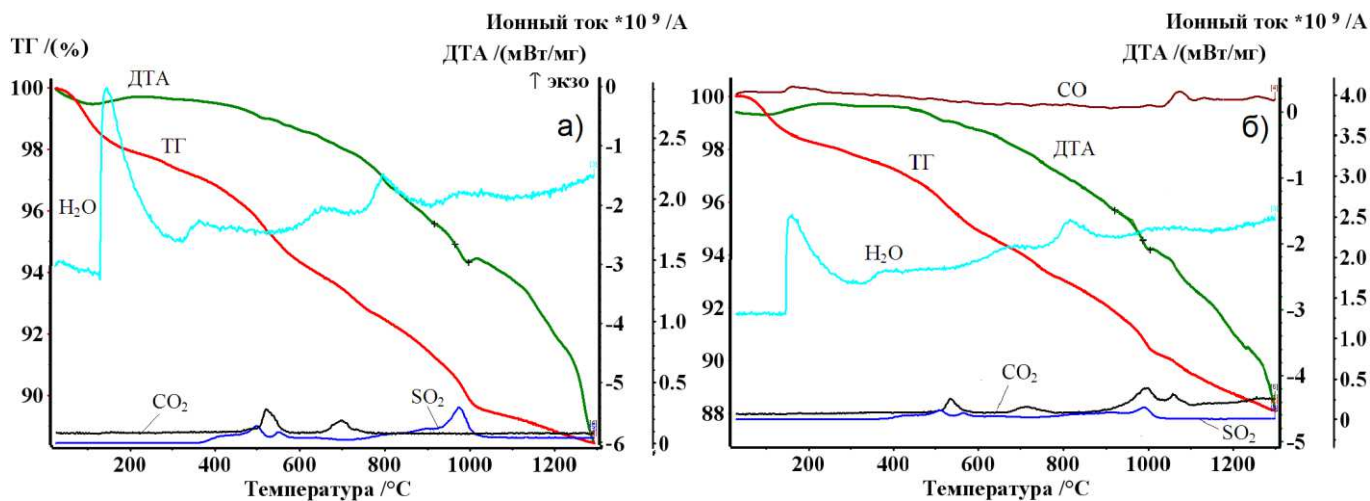


Рисунок 4 – Термограммы и данные масс-спектрометрического анализа газов при нагреве (аргон, 10 °С/мин) смесей никелевой руды, огарка медной руды ($D_s = 73\%$) и кокса, взятых в соотношении 100 : 60 : 0 (а) и 100 : 60 : 2,5 (б)

В третьей главе приведены результаты термодинамического моделирования плавки смесей окисленных никелевых (ОНР) и сульфидных медных (СМР) руд. Моделирование вели с учётом термодинамических свойств 88 соединений и индивидуальных веществ. Состав исходного рабочего тела принят исходя из фазового состав руд и огарков, в качестве флюса в него добавляли СаО в количестве 10 % от массы никелевой руды. Разделением рабочего тела на сульфидно-металлическую и оксидную группы фаз при заданной температуре оценивали составы формирующихся штейна и шлака. Моделирование нагрева до 1400 °С рабочего тела, отвечающего смеси никелевой и медной руд при массовых соотношениях от 1 до 10, указывает на возможность формирования штейна, концентрирующего никель, кобальт и медь. С ростом доли медной руды масса штейна монотонно возрастает, при этом отмечается снижение содержаний в нём цветных металлов. Так, при соотношении руд, равном 5, в штейне содержится 19,2 % Ni, 3,3 % Cu, 0,9 % Co; а равном 1 – 3,0 % Ni, 2,5 % Cu, 0,4 % Co. При высоком уровне извлечения целевых компонентов (91,5–95,5 % никеля, 99,9 % меди, 33,8–85,6 % кобальта), отмечаемом для всех смесей, соотношение Ni : Cu в интервале от 1 до 2 достигается лишь при соотношении руд от 1 до 1,7, отвечающем бедным штейнам, содержащим 5,9–8,5 % суммы цветных металлов.

Добавка восстановителя (углерод) в рабочее тело, составленное из никелевой и медной руд в соотношении 1,7 (или 100 : 60), повышает металлизацию штейна,

обуславливающую рост извлечение никеля, меди и кобальта. Десульфуризация при плавке составляет 22,8 %.

Термодинамическое моделирование плавки никелевой руды с огарком медной руды, полученным при обжиге с $D_s = 78$ %, указывает на возможность выделения продукта (состав, %: 11,1 Ni, 9,9 Cu, 0,9 Co, 3,5 Zn, 0,02 As, 49,1 Fe, 30,6 S), близкого по качеству к промышленным медно-никелевым штейнам. Его низкая металлизация ($\alpha = 6$ %) предопределяет невысокое извлечение никеля (87 %) и кобальта (40 %). Десульфуризация составляет 50 %, что связано с взаимодействиями высших оксидов железа с его сульфидами (троилит, пирротин). Условные константы равновесия ($K_{Me/Fe}$) обменных реакций $MeO + FeS = MeS + FeO$, характеризующие потери металлов со шлаком, для никеля и кобальта составляют 0,018 и 0,159 соответственно.

Введение в рабочее тело углерода приводит к закономерным увеличению массы штейна и снижению – шлака, что связано с восстановлением железа из оксидов. Отмечаются снижение содержания в штейне целевых металлов, увеличение металлизации до 69 %, повышение извлечения никеля, меди и кобальта (рис. 5), сокращение десульфуризации до 2,6 %. Часть цинка и вся сурьма удаляются с газовой фазой, снижается переход в штейн мышьяка.

Моделирование плавки никелевой руды с продуктом более полного обжига медной руды ($D_s = 93$ %) указало на возможность снижения массы штейна и увеличения – шлака (рис. 6), что обусловлено преобладанием в огарке оксидов железа. Штейны отличаются повышенным содержанием цветных металлов, но меньшим их извлечением. Глубокое окисление медной руды при обжиге способствует сохранению мышьяка в конденсированном продукте в виде As_2O_5 и переходу его в шлак на 50–70 %. В то же время повышается основность шлаков, значения $K_{Ni/Fe}$ и $K_{Co/Fe}$ снижаются до 0,003 и 0,023 соответственно. Десульфуризация зависит от окисленности медной руды и количества введённого углерода и составляет 1,3–12,4 %.

Полученные данные указывают на возможность регулирования состава штейна за счёт варьирования следующих параметров: соотношения рудных компонентов, количества восстановителя и полноты обжига медной руды.

По результатам термодинамического моделирования предложены условия ведения плавки руд, оценены равновесные составы и количества образующихся продуктов. Оптимальным вариантом переработки исследуемых руд является плавка при 1300 °С шихты, составленной из никелевой руды, огарка медной руды ($D_s = 70$ –80 %), флюса (в пересчёте на CaO) и кокса (в пересчёте на углерод), взятых в соотношении 100 : (60–80) : 10 : (1–3). Расчётный состав штейна (масса – 10,4 % от

конденсированной части исходного рабочего тела) в этом случае отвечает технологическим требованиям действующих предприятий и включает, %: 61,5 Fe, 25,9 S, 6,3 Ni, 4,2 Cu, 0,79 Co, 1,2 Zn, 0,08 Pb, 0,01 As. Извлечение в штейн составляет, %: 98,2 Ni, 99,9 Cu, 89,6 Co, 31,8 Zn, 20,6 Pb, 4,8 As; степень его металлизации – 36,4 %. Десульфуризация при плавке снижается до 2,9 %. Шлак (83,4 % от конденсированной части исходного рабочего тела) содержит, %: 55,0 SiO₂, 13,6 MgO, 7,6 CaO, 3,5 Al₂O₃, 16,9 Fe, 0,01 Ni, 2,9·10⁻⁵ Cu, 0,01 Co, 0,04 Zn, 0,001 As, 2,3·10⁻⁴ Pb, 2,3·10⁻¹¹ Sb. Температуры плавления штейна (1080–1120 °С) и шлака (около 1250 °С) позволяют вести плавку в стандартных металлургических аппаратах.

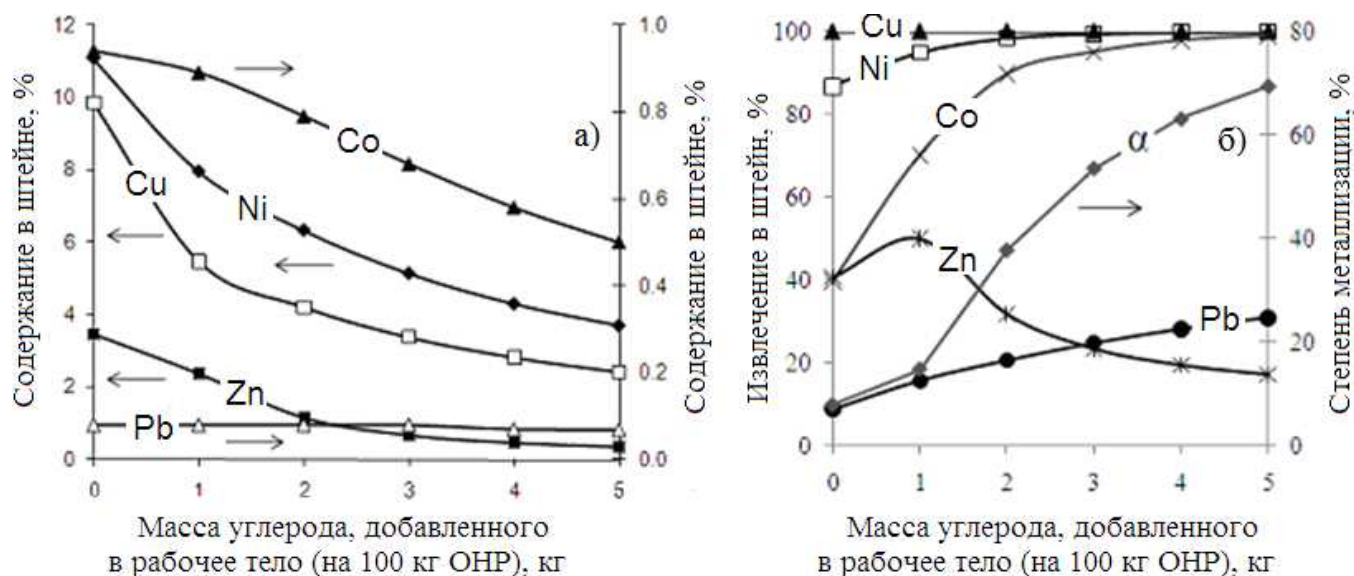


Рисунок 5 – Влияние добавки углерода при соотношении ОНР : огарок СМР ($D_s = 78\%$) = 100 : 60 на содержания металлов в штейне (а); их извлечение и металлизацию штейна (б)

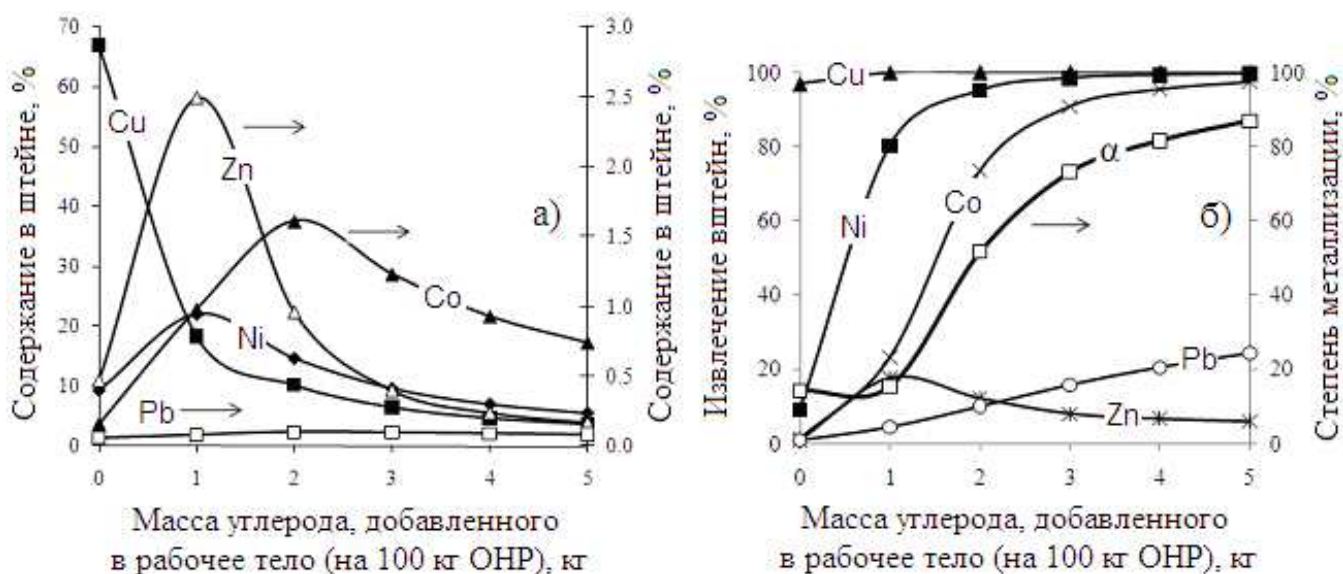


Рисунок 6 – Влияние добавки углерода при соотношении ОНР : огарок СМР ($D_s = 93\%$) = 100 : 60 на содержания металлов в штейне (а); их извлечение и металлизацию штейна (б)

В четвёртой главе представлены итоги экспериментального моделирования плавки на штейн окисленных никелевых и сульфидных медных руд. В ходе серии опытов варьировали параметры, определяющие технологические показатели процесса.

Восстановительная плавка (1300–1500 °С) смесей руд с добавлением СаО и кокса (10 и 5 % от массы никелевой руды) сопровождается процессами штейно-шлакообразования (табл. 1). Образующийся силикатный шлак содержит, %: 0,1 Ni, 0,1 Со, 0,1 Cu, 0,6–10,2 Fe, 53,7–57,8 SiO₂, 6,2–11,0 MgO, 2,1–16,3 Al₂O₃, 11,1–12,7 СаО (основность – 0,21–0,44). В зависимости от массового соотношения руд меняется состав штейна: увеличение доли медной руды закономерно повышает содержание в нём меди и кобальта, но снижает – никеля. Степень металлизации штейнов составляет 21–62 %, десульфуризация при плавке – 27,2–64,8 %.

Таблица 1 – Результаты совместной восстановительно-сульфидирующей плавки руд

№ опыта	Масса, г		Фаза	Кол-во от шихты, %	Содержание (β) и распределение (ε), %											
	ОНР	СМР			Ni		Cu		Co		Zn		Fe		S	
					β	ε	β	ε	β	ε	β	ε	β	ε	β	ε
1	100	100	штейн	18,8	1,50	75,6	2,24	95,4	0,25	69,6	-	-	66,4	61,8	22,2	32,3
			шлак	75,8	0,12	24,4	0,03	4,6	0,03	30,4	-	-	10,2	38,2	0,5	2,9
2	100	60	штейн	26,8	2,22	89,3	1,07	88,3	0,22	75,2	0,48	45,8	58,5	96,9	22,5	63,4
			шлак	61,6	0,12	10,7	0,06	11,7	0,03	24,8	0,14	30,2	0,81	3,1	0,04	0,3
3	100	30	штейн	22,1	3,22	88,7	0,67	74,9	0,20	63,7	0,12	15,6	55,1	97,0	15,8	61,0
			шлак	60,2	0,15	11,3	0,08	25,1	0,04	36,3	0,09	30,2	0,6	3,0	0,03	0,3
4	100	10	штейн	12,7	8,02	90,8	0,68	45,7	0,16	68,8	-	-	59,0	77,0	12,6	72,2
			шлак	68,8	0,15	9,2	0,06	54,3	0,01	31,2	-	-	3,3	23,0	0,02	0,6

Сравнение коэффициентов распределения металлов между штейном и шлаком L_{Me} , определяемых как отношение содержаний целевых металлов в штейне и шлаке, и показателей кратности обогащения штейна ξ_{Me} , равных отношению содержаний металлов в штейне и исходном сырье, указывает на то, что уменьшение доли сульфидной руды в шихте ведёт к росту значений L_{Me} для никеля и кобальта, снижению – для меди, повышению ξ_{Me} по никелю и меди, понижению – по кобальту и цинку:

ОНР : СМР		L_{Ni}	L_{Cu}	L_{Co}	L_{Zn}	ξ_{Ni}	ξ_{Cu}	ξ_{Co}
1,0	.....	12	83	9	-	4	5	4
1,7	.....	19	17	7	4	3	3	3
3,3	.....	22	8	5	1	4	3	3
10,0	.....	54	11	12	1	8	9	2.

Фазовый состав штейнов отвечает известным данным о металлизированных продуктах шахтной плавки никелевых руд, где преобладают троилит и ферроникель. В штейне с меньшей металлизацией выявлен пентландит (Ni,Fe)₉S₈, а в образце с повышенным содержанием никеля – Ni₃Fe. Основу шлаков составляет силикатное

стекло с включениями кристаллов мета- и ортосиликатов кальция, магния, алюминия и железа. В шлаке с повышенным содержанием железа выявлены ларнит, ферросилит, α -тридимит; в безжелезистых – пижонит, волластонит, авгит. В некоторых образцах отмечены геденбергит и лайхунит.

С целью выяснения форм нахождения цветных металлов в штейне, содержащем, %: 2,22 Ni, 0,22 Co, 1,07 Cu, 58,5 Fe, 22,5 S, 5,0 O, оценена его микроструктура на границе «штейн – шлак» (рис. 7). В зоне оксидных соединений данные микрорентгеноспектрального анализа указывают на образование силикатного стекла, содержащего 5–7 % Fe, 10–14 % Mg, 25–29 % Si. В штейне преобладают зёрна пирротина и троилита размером 10–70 мкм, содержащие до 0,8 % Ni. В троилите обнаружены включения (5–10 мкм) кристофита $Zn_{1-x}Fe_xS$ (28–32 % Zn). На ряде участков шлифа основа из $Fe_{1-x}S$ окружена фазами (10–30 мкм), отвечающими системе $Cu_{2-x}S-Zn_{1-x}Fe_xS$, в которых содержится 6–37 % Zn, 6–20 % Cu, 0,5 % Ni. Основная часть никеля ассоциирована с железом и образует кристаллиты ферроникеля в виде мелких (5 мкм) включений в троилите. Ферроникель содержит 77–93 % Fe, 5–18 % Ni, 1,8–2,2 % Co. Тенденция концентрирования никеля в ферроникеле прослеживается и на других участках, где более крупные (5–20 мкм) зёрна металлической фазы содержат 69–93 % Fe, 5–26 % Ni, 2,0–2,2 % Co. Кобальт также преимущественно находится в ферроникеле. Таким образом, продукт относится к категории металлизированных бедных медно-никелевых штейнов, концентрирующих медь, никель, кобальт и драгоценные металлы.

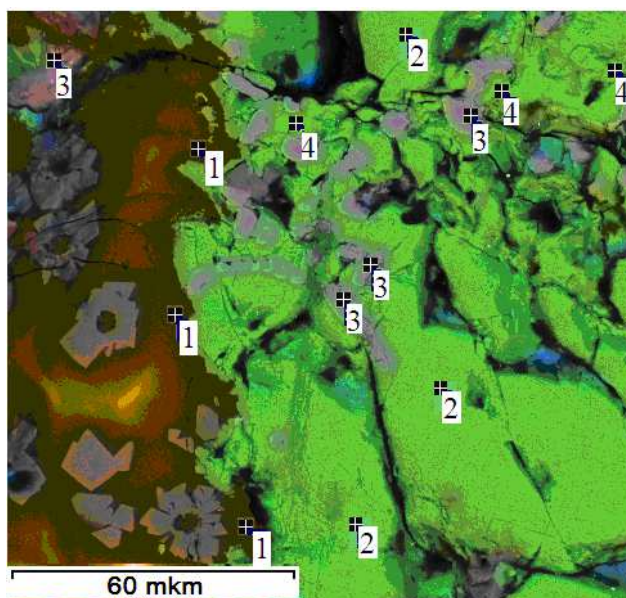


Рисунок 7 – Микроструктура границы «штейн – шлак» и точки зондирования фаз:

1 – $Fe_{0,1-0,2}Mg_{0,4-0,6}SiO_{3,0-3,1}$; 2 – $Fe_{0,9}S$; 3 – Fe, Ni; 4 – $Zn_{0,4-0,5}Fe_{0,6-0,5}S$

Эксперименты по окислительной плавке (1300–1500 °С) руд показали (табл. 2), что барботаж расплава воздухом ведёт к сокращению количества штейна.

Достигается высокая степень его обогащения по никелю и меди, однако извлечение кобальта остаётся на низком уровне. Значительная доля в шихте сульфидной медной руды и длительное окисление являются причиной образования в ряде опытов гомогенного нерасплаивающегося расплава.

Переplав (1300 °C) в восстановительных условиях (графитовый тигель) смеси никелевой руды, частично окисленной медной руды и флюса (CaO), взятых в соотношении 100 : 60 : 10 (табл. 3), обеспечивает повышенное содержание цветных металлов в штейне (степень металлизации – 14–25 %). С увеличением D_s при обжиге от 60 до 73 % содержания железа, серы и кислорода в нём практически не меняются и составляют 59–63, 22–24 и 4–5 % соответственно. Выделенные шлаки имеют основность 0,7–0,8 и являются отвальными.

Таблица 2 – Результаты совместной окислительной плавки руд

№ опыта	Масса, г			Время продувки, мин	Фаза	Кол-во, %	Содержание (β) и распределение (ε), %									
	ОНР	СМР	СаО				Ni		Cu		Co		Zn		Fe	
							β	ε	β	ε	β	ε	β	ε	β	ε
5	100	100	10	20	штейн	1,5	18,6	74,5	22,6	76,2	0,70	15,5	-	-	28,6	2,1
					шлак	88,3	0,11	25,5	0,12	23,8	0,07	84,5	0,12	27,1	20,1	97,9
6	100	52	10	20	штейн	0,9	32,9	57,9	19,6	55,5	0,54	8,6	-	-	16,0	0,8
					шлак	79,5	0,26	42,1	0,17	44,5	0,06	91,4	0,14	42,3	21,0	99,2
7	60	100	10	40	сплав	78,4	0,53	100	0,71	100	0,12	100	0,08	28,9	28,9	100
8	30	100	10	5	сплав	80,5	0,31	100	0,84	100	0,12	100	0,01	32,0	32,0	100

Таблица 3 – Результаты совместной плавки никелевой руды, огарков медной руды и флюса, взятых в соотношении 100 : 60 : 10 (графитовый тигель)

№ опыта	D_s при обжиге СМР, %	Фаза	Кол-во от шихты, %	Содержание (β) и распределение (ε), %									
				Ni		Cu		Co		Zn		Pb	
				β	ε	β	ε	β	ε	β	ε	β	ε
9	60	штейн	14,9	3,68	80,2	1,55	56,7	0,31	53,5	0,33	14,2	0,07	37,2
		шлак	73,5	0,18	19,8	0,24	43,3	0,06	46,5	0,19	39,1	0,01	26,1
10	73	штейн	15,0	4,06	89,2	2,48	72,7	0,38	56,0	0,03	0,1	0,14	39,7
		шлак	73,6	0,10	10,8	0,19	27,3	0,06	44,0	0,18	21,8	0,01	13,9

Продолжение таблицы 3

№ опыта	Содержание (β) и распределение (ε), %									
	Fe		As		S		Au		Ag	
	β	ε	β	ε	β	ε	β, г/т	ε	β, г/т	ε
9	59,4	50,3	0,03	39,7	24,0	75,1	1,4	99,5	3,1	99,5
	12,9	49,7	0,001	7,0	0,5	7,1	-	0,5	-	0,5
10	63,3	45,6	0,03	35,4	22,0	88,0	2,1	99,5	3,5	99,5
	15,4	54,4	0,001	7,0	0,2	6,0	-	0,5	-	0,5

По результатам опытов рассчитаны достигнутые показатели:

D_s при обжиге	L_{Ni}	L_{Cu}	L_{Co}	L_{Zn}	L_{Pb}	L_{As}	ξ_{Ni}	ξ_{Cu}	ξ_{Co}	$K_{Ni/Fe}$	$K_{Co/Fe}$	$K_{Cu/Fe}$	
60 %	20	6	6	2	7	28	5	4	5	0,230	0,810	0,709
73 %	41	13	6	0,2	14	25	6	5	4	0,101	0,658	0,316

Повышение полноты обжига (десульфуризации) медной руды ведёт к обогащению штейна никелем и медью. Наблюдаемое при этом снижение $K_{Me/Fe}$ указывает на сокращение потерь металлов со шлаком. Другим преимуществом использования огарка с меньшим содержанием серы является снижение десульфуризации при плавке с 18 до 6 %, что в 5–10 раз ниже, чем при использовании медной руды, не подвергавшейся предварительной термической обработке.

В ходе укрупнённо-лабораторных опытов по плавке никелевой руды и огарка медной руды получены результаты, незначительно отличающиеся от представленных. При количестве образующегося штейна на уровне 15 % от шихты суммарное содержание в нём Ni, Cu, Co находится в пределах 7,0–7,5 %, а их извлечение составляет 90,3, 82,7 и 85,3 % соответственно. Кратность обогащения штейна – не менее 5, металлизация – около 25 %. Степень десульфуризации при плавке равна 13,2 %. Шлак (72,9 % от шихты) имеет несколько большую основность (0,8) и содержит, %: 0,09 Ni, 0,12 Cu, 0,02 Co, 0,2 Zn, 0,01 Pb, 0,001 As, 0,2 S, 15,7 Fe, 50,0 SiO₂, 14,2 MgO, 4,8 Al₂O₃, 9,4 CaO. Коэффициенты распределения целевых металлов между штейном и шлаком и условные константы равновесия обменных реакций имеют следующие значения:

L_{Ni}	L_{Cu}	L_{Co}	L_{Zn}	L_{Pb}	L_{As}	ξ_{Ni}	ξ_{Cu}	ξ_{Co}	$K_{Ni/Fe}$	$K_{Co/Fe}$	$K_{Cu/Fe}$
48	25	30	0,05	14	25	6	5	6	0,084	0,134	0,163.

В ходе эксперимента практически не выявлено отличий в результатах моделирования для лабораторного и укрупнённо-лабораторного масштабов, что свидетельствует о благоприятных перспективах промышленной реализации процесса.

Опробование восстановительно-сульфидирующей плавки окисленной никелевой и сульфидной медной руд проведено в условиях производства ЗАО ПО «Режникель». На переработку поступала никелевая руда, содержащая, %: 1,1–1,2 Ni, 0,02–0,04 Co, 4,7–6,9 Al₂O₃, 21,6–26,6 Fe₂O₃, 11,7–16,0 MgO, 43,0–45,3 SiO₂. В качестве топлива использовали кокс (86,5 % C, 0,5 % S, 12 % золы, 1 % летучих), флюса – известняк (50 % CaO). Сульфидизатором служила смесь пиритного и медного концентратов, имеющих следующий состав, %: пиритный концентрат – 0,047 Ni, 0,05 Co, 0,086 Cu, 0,6 Zn, 0,21 Pb, 0,14 As, 0,15 Sb, 45,0 Fe, 48,0 S, 0,9 г/т Au, 8,9 г/т Ag; медный концентрат – 0,003 Ni, 19,67 Cu, 3,42 Zn, 0,33 Pb, 0,31 As, 0,20 Sb, 30,8 Fe, 37,7 S, 6,4 г/т Au, 85,6 г/т Ag. Переработку сырья вели в соответствии с принятой на заводе технологической схемой. В ходе испытаний фиксировали количество загружаемых материалов, регистрировали режимные показатели работы шахтных печей, проводили отбор проб сырья и продуктов плавки для химического анализа.

Образующийся отвальный шлак (85,3 % от массы руды) содержал, %: 0,11 Ni, 0,06 Cu, 0,012 Co, 12,9–15,4 Fe, 44,0–47,4 SiO₂, 13,0 MgO, 4,9 Al₂O₃, 11,1 CaO, 0,013 г/т Au, 0,12 г/т Ag (основность – 0,5). Штейн (11,5 % от массы руды) имел следующий состав, %: 10,1 Ni, 2,1 Cu, 0,28 Co, 0,15 Zn, 0,14 Pb, 0,059 As, 0,042 Sb, 60,4 Fe, 22,7 S, 1,51 г/т Au, 16,99 г/т Ag. Извлечение металлов в штейн составило, %: 96,6 Ni, 72,5 Co, 79,3 Cu, 24,2 Zn, 60,2 Pb, 35,6 As, 32,5 Sb, 94 Au, 95 Ag. В газовую фазу перешло, %: 41,3 S, 48,9 As, 61,8 Sb. Неучтённые потери с пылегазовой фазой – 7,1 % Zn и 8,0 % Pb. Значения коэффициентов распределения металлов между штейном и шлаком превышают аналогичные показатели лабораторных испытаний восстановительно-сульфидирующей плавки руд, а условные константы равновесия обменных реакций между штейном и шлаком практически совпадают с данными промышленной практики.

Совместная плавка никелевой руды и сульфидного медного сырья в шахтной печи подтверждает возможность промышленной реализации процесса. Установлена возможность выделения легкоплавкого отвального шлака, состав которого соответствует требованиям к промышленным образцам. Сульфидно-металлический продукт (штейн), отличаясь от никелевого содержанием меди, соответствует требованиям к медно-никелевым штейнам, и пригоден для комплексной переработки по известным технологиям с извлечением в самостоятельные продукты никеля, меди, кобальта и драгоценных металлов.

В пятой главе с использованием полученных экспериментальных данных обоснована технология совместной пирометаллургической переработки окисленной никелевой и сульфидной медной руд. Разработанная технологическая схема (рис. 8) базируется на процессах обжига руд и плавки огарков. В качестве исходного сырья взяты руды Серовского и Дергамышского месторождений. Готовой продукцией производства являются: штейн медно-никелевый, содержащий не менее, %: 3,3 Cu, 4,7 Ni, 0,6 Co, 1,5 г/т Au, 2,6 г/т Ag; шлак гранулированный, %: 0,01–0,02 Ni, 0,01–0,02 Cu, 0,01–0,06 Co, 13–16 Fe, 44–50 SiO₂, 13–14 MgO, 4–5 Al₂O₃, 9–11 CaO; кислота серная техническая (массовая доля моногидрата не менее 92,5 %).

Проведены металлургические расчёты по всем технологическим операциям схемы, выбрано и рассчитано основное оборудование. Расчётный состав отходящих газов (табл. 4) свидетельствует о том, что объёдинённый газ переделов обжига медной руды и плавки смеси огарков никелевой и медной руд содержит 11,1 % об. SO₂ и пригоден для сернокислотного производства, а выделяющийся при прокатке никелевой руды – не требует дожигания.

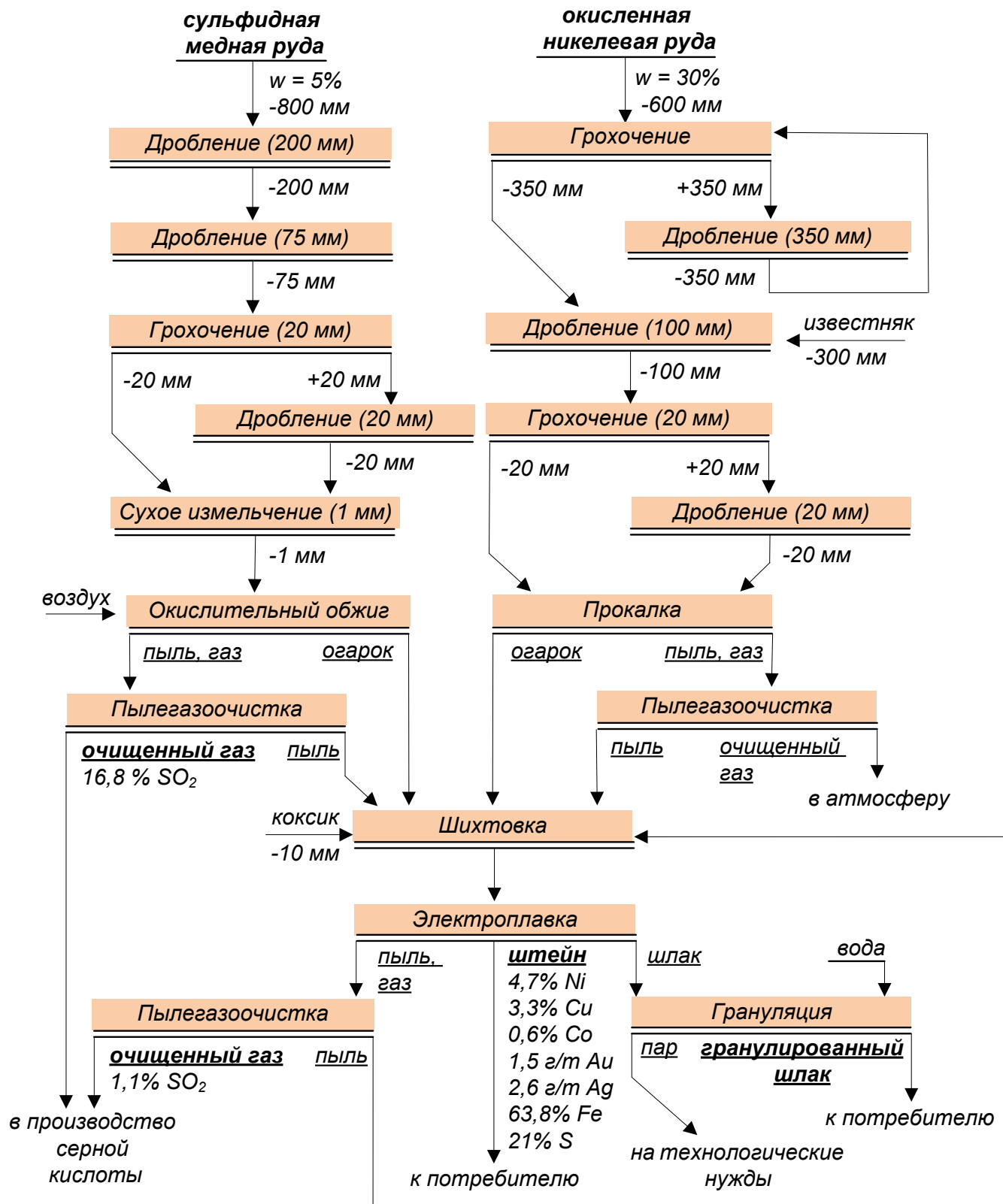


Рисунок 8 – Технологическая схема переработки руд

Таблица 4 – Составы отходящих газов переделов обжига и плавки

Наименование операции	Содержание, % об.				
	SO ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
Обжиг медной руды	16,8	3,3	3,1	69,8	7,0
Прокалка никелевой руды	0,02	17,0	12,9	7,1	63,0
Плавка смеси огарков	1,2	14,7	5,9	77,3	1,0

По известным методикам выполнено предварительное технико-экономическое обоснование организации промышленного производства по переработке смеси руд мощностью 700 тыс. т в год (400 тыс. т никелевой и 300 тыс. т медной). Выпуск готовой продукции, тыс. т в год: штейн медно-никелевый – 94,9 (в пересчёте на никель – 4,5, медь – 3,1, кобальт – 0,6); шлак гранулированный – 512,3; кислота серная техническая – 235,5. Расчётный период реализации проекта – 13 лет. Общая сумма инвестиционных затрат – 1,4 млрд руб., текущие издержки на годовую производственную программу – 3,8 млрд руб. Финансовые результаты реализации инвестиционного проекта характеризуются следующими значениями показателей: чистая прибыль – 5,7 млрд руб., чистый дисконтированный доход – 1,6 млрд руб., индекс доходности дисконтированных инвестиций – 2,1, внутренняя норма доходности – 36,4 %, дисконтированный срок окупаемости – 5,5 лет. Полученные результаты свидетельствуют о состоятельности и экономической эффективности проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современных металлургических технологий выявлены предпосылки повышения технико-экономической и экологической эффективности переработки сырья из месторождений различных геолого-промышленных типов – окисленных никелевых и сульфидных медных руд. Восстановительно-сульфидирующая плавка никелевой руды с использованием медной руды в качестве сульфидизатора позволяет выделить штейн, аккумулирующий цветные и драгоценные металлы. Обоснование способа проведено на примере руд Серовского и Дергамышского месторождений.

2. Подтверждены формы нахождения металлов и тонкое взаимное прораствание минералов (халькопирита, сфалерита и пирита) сульфидной медной руды Дергамышского месторождения. Впервые в руде обнаружены одиночные включения аргентопирита. Методом термического анализа выявлены температурные границы устойчивости сульфидов, сульфатов, оксидов, карбонатов и гидросиликатов, определяющие температуру обжига (700–900 °С), обеспечивающую удаление в газовую фазу более 60 % серы. Разложение пирита ведёт к образованию пирротинов $Fe_{0,80-0,93}S$, в которых содержится до 3,2 % Cu и 0,7 % Co.

3. На основе данных о структуре и термических свойствах магнезиальной никелевой руды Серовского месторождения обоснована целесообразность использования её флюсующей способности для ошлакования оксидов железа, образующихся при окислении сульфидной медной руды.

4. Частичный окислительный обжиг сульфидной медной руды с десульфуризацией 60–85 % позволяет получать сульфидизатор с регулируемым

содержанием серы и использовать выделяющиеся газы для производства серной кислоты. Термические свойства смесей окисленной никелевой руды и огарка сульфидной медной руды пояснены наложением процессов, имеющих место в ходе раздельного нагрева этих материалов.

5. Термодинамическим моделированием установлены равновесные количества и составы фаз при нагреве до 1400 °С смеси окисленной никелевой и сульфидной медной руд с добавлением флюса. Разделением рабочего тела на сульфидно-металлическую и оксидную группы фаз оценены составы формирующихся штейна и шлака. Последовательным усложнением системы за счёт введения восстановителя и перехода от медной руды к продуктам её обжига установлена возможность и определены условия формирования штейна, близко отвечающего медно-никелевому. Рассчитаны значения показателей извлечения металлов, кратности обогащения штейна, коэффициентов распределения металлов между продуктами, необходимые для технологического моделирования.

6. Экспериментальным моделированием восстановительно-сульфидирующей плавки (1300 °С) определены оптимальные соотношения никелевой руды, медной руды или её огарка, оксида кальция и кокса в шихте в пределах 100 : (10–60) : 10 : (1–5), позволяющие выделить штейны с извлечением в них до 90,3 % никеля, 82,7 % меди, 85,3 % кобальта, 99,5 % драгоценных металлов. Замена сульфидной медной руды продуктом её окислительного обжига позволяет в 5–10 раз снизить десульфуризацию при плавке и повысить суммарное содержание Ni, Cu и Co в штейне до 7,5 %.

7. Определены составы фаз медно-никелевого штейна и формы нахождения в них цветных металлов. Часть никеля и кобальта изоморфно замещает железо в решётке пирротина (троилита) и пентландита. Основная масса находится в ферроникеле. Медь концентрируется в борните, цинк – в сфалерите и впервые выявленном в охлаждённом штейне кристофите.

8. Сопоставлением результатов термодинамического и лабораторного моделирования совместной плавки руд подтверждено уменьшение условных констант равновесия обменных реакций между оксидами и сульфидами металлов с повышением степени металлизации штейна, что позволяет регулировать потери металлов со шлаком.

9. Разработана технологическая схема переработки руд уральских месторождений, включающая прокалку окисленной никелевой руды, частичный окислительный обжиг сульфидной медной руды, шихтовку огарков с известняком и коксиком и плавку шихты на медно-никелевый штейн. Технология обеспечивает

повышение комплексности использования сырья и сокращение выбросов диоксида серы газов в атмосферу.

10. Техничко-экономическое обоснование организации промышленного производства по переработке смеси окисленной никелевой и сульфидной медной руд мощностью 700 тыс. т в год показало, что при сроке окупаемости 5,5 лет инвестиционный проект обеспечивает получение чистого дисконтированного дохода 1,6 млрд руб. Эти данные свидетельствуют об экономической состоятельности проекта.

Научные результаты работы рекомендуется использовать в качестве учебно-методических материалов при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия цветных металлов».

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с исследованием возможности расширения и модификации технологической схемы, обеспечивающих:

- применение для переработки руд современных плавильных агрегатов (Ausmelt и др.);
- выделение цинка и свинца в ликвидные товарные продукты;
- повышение полноты использования вторичных энергоресурсов;
- максимальную эффективность утилизации отвальных шлаков.

Список работ, в которых изложены основные результаты диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. Селиванов, Е.Н. Исследование структуры и фазового состава медно-кобальтовых сульфидных руд Дергамышского месторождения / Е.Н. Селиванов, Р.И. Гуляева, А.М. Ключников // Цветные металлы. – 2016. – № 3. – С. 13–17.

2. Состав и структура продуктов совместной плавки окисленных никелевых и сульфидных медных руд / Е.Н. Селиванов, А.М. Ключников, В.М. Чумарёв, Р.И. Гуляева, В.Г. Лобанов // Бутлеровские сообщения. – 2016. – Т. 47. – № 7. – С. 36–42.

3. Ключников, А.М. Термодинамическое моделирование совместной переработки окисленной никелевой и сульфидной медной руд / А.М. Ключников, Е.Н. Селиванов // Бутлеровские сообщения. – 2017. – Т. 49. – № 1. – С. 34–42.

4. Селиванов, Е.Н. Использование кварцсодержащих материалов в качестве флюсов в медеплавильном производстве / Е.Н. Селиванов, А.М. Ключников, Р.И. Гуляева // Metallurg. – 2017. – № 2. – С. 75-79.

В прочих изданиях:

5. Селиванов, Е.Н. Техничко-экономическая оценка прямой металлургической переработки сульфидных руд / Е.Н. Селиванов, Р.И. Гуляева, А.М. Ключников // Цветная металлургия. – 2015. – № 3. – С. 15–21.

6. Перспективы прямой металлургической переработки сульфидных руд / Е.Н. Селиванов, А.М. Ключников, Р.И. Гуляева, В.М. Чумарёв, В.Н. Закирничный // Сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием и элементами школы молодых учёных «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. – С. 309–312.

7. Ключников, А.М. Термические свойства кварцсодержащих материалов / А.М. Ключников, Р.И. Гуляева, Е.Н. Селиванов // Сб. тр. XXI науч.-техн. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». – Екатеринбург: Форт Диалог–Исеть, 2016. – С. 187–191.

8. Совместная пирометаллургическая переработка окисленных никелевых и сульфидных медных руд / А.М. Ключников, Е.Н. Селиванов, Р.И. Гуляева, В.М. Чумарёв // Сб. тр. III конгр. с междунар. участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». – Екатеринбург: ФГБУН ИМЕТ УрО РАН, 2017. – С. 263–266.

9. Ключников, А.М. Объект и предмет металлургии: историко-философский обзор / А.М. Ключников, С.В. Токмянина // Сб. тр. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – С. 43.

10. Заявка на патент Российская Федерация, МПК С22 В 23/00, 23/02. Шихта для восстановительно-сульфидирующей плавки окисленных никелевых руд / Е.Н. Селиванов, А.М. Ключников, В.М. Чумарёв, Р.И. Гуляева ; заявитель ФГБУН ИМЕТ УрО РАН ; № 2017120242 ; заявл. 08.06.2017.

Отпечатано в типографии
ООО «Копи Мастер»
620014, Екатеринбург, ул. Шейнкмана, 57
Тел. (343) 376-45-19
Заказ 1973 Тираж 110 экз.